

LA GÉO-INGÉNIERIE CLIMATIQUE : APPROCHE COMPLÉMENTAIRE OU CONTRADICTOIRE AUX
EFFORTS D'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE?

Par
Nadia Ait Ali

Essai présenté au Centre universitaire de formation en
environnement et en développement durable en vue de
l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

Sous la direction de François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Février 2019

SOMMAIRE

Mots-clés : technologies de géo-ingénierie, changements climatiques, gaz à effet de serre, retrait du dioxyde de carbone de l'atmosphère, gestion de radiations solaires, effets secondaires.

Le réchauffement climatique est un processus global de modification du climat causé par les émissions importantes de gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère. La géo-ingénierie figure parmi les solutions explorées pour contrer ce problème. Elle comprend plusieurs technologies qui se distinguent par leur maturité, leur potentiel d'atténuation du réchauffement planétaire, leurs risques éventuels, et leur acceptabilité sociale. L'objectif de cet essai consiste donc à évaluer l'état d'avancement, l'efficacité et les effets secondaires de ces approches pour leur déploiement à grande échelle. Le premier chapitre présente un résumé des efforts utilisés par le gouvernement québécois et fédéral pour réduire leur émission de gaz à effets de serre. Le deuxième chapitre quant à lui comprend une revue des informations sur les principales technologies de géo-ingénierie. Les enjeux éthiques, la gouvernance et l'acceptabilité sociale de la géo-ingénierie sont discutés dans le troisième chapitre.

Pour réaliser l'objectif global de l'essai, une analyse multicritère a été menée dans le chapitre quatre. La première étape de cette dernière a permis d'identifier les technologies qui sont les plus avancées. Lors de la deuxième étape de l'analyse, quatre technologies ont été sélectionnées pour leur comparaison détaillée dans la troisième étape. Elles concernent la capture directe du dioxyde de carbone de l'atmosphère, le biochar, la bioénergie et le boisement/reboisement. Le biochar est un charbon riche en carbone généré par pyrolyse d'une variété de résidus de biomasse végétale, et qui peut séquestrer le carbone dans le sol pendant une très longue période. La comparaison de ces quatre approches précitées a été basée sur certains critères choisis selon leur importance vis-à-vis de l'atténuation des gaz à effet de serre. Grâce à cette analyse, les technologies qui auraient moins d'impacts négatifs ont été mises en évidence.

Les résultats ont montré que le biochar se place en première position, car il présente un impact global positif le plus élevé au niveau des trois volets : environnement, économie et social. Il est suivi par la capture directe du dioxyde de carbone, le boisement/reboisement et en dernier lieu par la bioénergie. Plusieurs recommandations sont indiquées au chapitre cinq quant à l'utilisation de ces approches comme mesures d'atténuation des changements climatiques. Par exemple, pour le biochar, une évaluation de son effet potentiel sur l'albédo des surfaces terrestres est essentielle avant sa mise en œuvre. La technologie de capture directe du dioxyde de carbone est très énergivore. Pour cela, elle nécessiterait l'emploi d'une énergie renouvelable pour diminuer ses coûts. En conclusion, les technologies de géo-ingénieries qui ont moins d'impacts négatifs sont le biochar et la capture directe du dioxyde de carbone de l'atmosphère. Ces approches pourraient être déployées comme mesures complémentaires aux efforts de réduction des gaz à effet de serre. Par contre, elles ne devraient pas être considérées comme une substitution à ces efforts.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur d'essai, monsieur François Lafortune, pour ses commentaires, son inspiration, et ses suggestions pertinentes. Ces derniers m'ont permis d'améliorer ma rédaction, et d'orienter mes réflexions pour tenir compte des différentes facettes de ce projet. Je le remercie aussi pour son encouragement, et son respect des contraintes de mon échéancier.

Mes sincères remerciements s'étendent également à tous les professeurs qui m'ont enseigné au programme de maîtrise en environnement, et le personnel du CUFE pour les efforts déployés pour offrir une formation de qualité et actualisée. Merci à madame Geneviève Desroches pour ses directives, ainsi que madame Judith Vien pour son suivi au cours de la rédaction. Merci à Carole Arsenault d'avoir répondu à toutes mes questions sur la mise en forme de mon essai. C'est bien apprécié.

Un grand merci à mes amis(e)s qui m'ont motivé et m'ont fait sentir moins isolée lors de la période de la rédaction de ce projet.

Enfin, qu'il me soit permis de remercier toute ma famille, et en particulier mon conjoint et mes deux enfants pour leur patience et leur soutien constant. Espérant par ce travail, je vous inspire à mon tour!

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1 EFFORTS D'ATTÉNUATION DES GES AU QUÉBEC ET AU CANADA.....	4
1.1 Contribution du forçage radiatif anthropique au réchauffement planétaire.....	4
1.2 Rôle de l'accord de Paris dans la lutte contre les CC.....	6
1.2.1 Engagement des pays signataires	7
1.3 Portrait des émissions de GES au Québec et au Canada.....	7
1.4 Efforts d'atténuation des GES du gouvernement de Québec.....	11
1.4.1 Plan d'action 2013-2020 sur les CC	12
1.4.2 Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission	12
1.4.3 Autres mesures du gouvernement en lien avec la lutte contre les CC	13
1.5 Efforts d'atténuation des GES du gouvernement fédéral	15
1.5.1 Tarification de la pollution par le carbone.....	16
1.5.2 Mesures complémentaires à la tarification de la pollution par le carbone.....	16
1.5.3 Mesures d'adaptation aux impacts des CC et le développement des technologies propres.....	17
2 DÉFINITION DE LA GÉO-INGÉNIERIE.....	19
2.1 Techniques de gestion de rayonnement solaire	20
2.1.1 Emploi des aérosols stratosphériques.....	22
2.1.2 Éclaircissement des nuages marins	25
2.1.3 Augmentation de l'albédo des terres cultivées et des prairies	29
2.1.4 Augmentation de l'albédo des milieux urbains	31
2.1.5 Augmentation de l'albédo des océans.....	33
2.1.6 Les miroirs réfléchissants dans l'espace	34
2.2 Technologies de retrait de CO ₂ de l'atmosphère	36
2.2.1 Capture directe de CO ₂ dans l'air et son stockage.....	37
2.2.2 Bioénergie avec capture et stockage de carbone	41
2.2.3 Boisement/Reboisement.....	43
2.2.4 La production et l'emploi du biochar	45
2.2.5 Fertilisation des océans par des substances nutritives	49
2.2.6 Stimulation de l'altération de roches silicatées dans les terres ou les océans.....	50
3 ENJEUX DE LA GÉO-INGÉNIERIE	54
3.1 Gouvernance et géo-ingénierie.....	54
3.2 Éthique de la géo-ingénierie	58
3.3 Acceptabilité sociale.....	61

4	MÉTHODOLOGIE DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE	66
4.1	Première étape.....	67
4.2	Deuxième étape	67
4.3	Troisième étape : présentation de l'outil d'analyse multicritère	68
4.4	Contraintes et limites de l'analyse	70
4.5	Quatrième étape : présentation des résultats et justification.....	73
4.6	Résultat global	73
4.7	Résultats de la dimension environnementale	73
4.7.1	Atténuation du CO ₂ atmosphérique	75
4.7.2	Limiter les conflits d'usage des terres	75
4.7.3	Préservation de la biodiversité et des écosystèmes	76
4.7.4	Modification de l'albédo des surfaces terrestres	76
4.8	Résultats de la dimension sociale.....	77
4.8.1	Acceptabilité sociale des technologies	77
4.8.2	Assurer la sécurité alimentaire	78
4.8.3	Assurer l'approvisionnement en eau potable	79
4.8.4	Protection contre les catastrophes naturelles.....	80
4.9	Résultats de la dimension économique	80
4.9.1	Abordabilité du coût de mise en œuvre.....	81
4.9.2	Faible consommation d'énergie lors du déploiement	81
4.9.3	Effet sur le prix des denrées alimentaires	81
4.9.4	Favoriser l'emploi d'énergie à moindre impact.....	82
5	RECOMMANDATIONS	83
5.1	Recommandations quant à l'emploi potentiel du biochar	83
5.2	Recommandations quant à l'emploi de la capture directe de CO ₂ et son stockage.....	84
5.3	Recommandations quant à l'emploi potentiel du boisement/reboisement	86
5.4	Recommandations quant à l'emploi potentiel de la BECCS.....	86
	CONCLUSION.....	88
	RÉFÉRENCES.....	90

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Contribution des facteurs anthropiques et naturels au changement observé de la température globale de la Terre entre 1951 et 2010.....	5
Figure 1.2	Forçage radiatif en 2011 par rapport à 1750 causé par les GES et des processus naturels.....	5
Figure 1.3	Les émissions de GES par les provinces canadiennes en 2005, 2010 et 2016.....	8
Figure 1.4	Répartition des émissions de GES au Québec en 2016 par secteurs d'activité.....	10
Figure 1.5	Répartition des émissions de GES au Canada en 2015 par secteurs d'activité.....	10
Figure 1.6	Évolution des émissions de GES au Québec et cibles de réduction.....	11
Figure 1.7	Illustration des mécanismes de lutte contre les CC aux Québec.....	14
Figure 1.8	Illustration des différentes mesures en matière de lutte contre les CC aux Québec.....	15
Figure 2.1	Technologies de géo-ingénierie de retrait de CO ₂ de l'atmosphère et de gestion du rayonnement solaire.....	20
Figure 2.2	Illustration des technologies de gestion de rayonnement solaire.....	21
Figure 2.3	Représentation d'éclaircissement des nuages après injection des aérosols dans l'atmosphère.....	27
Figure 2.4	Miroir réfléchissant près du point L1 de Lagrange Soleil-Terre.....	35
Figure 2.5	Illustration des différentes technologies de retrait de CO ₂ atmosphérique.....	37
Figure 2.6	Principe de base de la technologie de capture directe de CO ₂ dans l'air ambiant et son stockage.....	38
Figure 2.7	Concept de la technologie de bioénergie avec capture et stockage de CO ₂	41
Figure 2.8	Illustration de la production du biochar par la pyrolyse d'une variété de matières premières et la formation de biocarburants et la chaleur.....	46
Figure 2.9	Propriétés physico-chimiques du biochar et ses différentes applications.....	47
Figure 4.1	Les grandes étapes de l'analyse multicritère.....	67
Tableau 1.1	Variation des émissions de GES par les provinces canadiennes en 2005, 2010 et 2016.....	9
Tableau 2.1	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par les aérosols stratosphériques.....	24
Tableau 2.2	Estimation de l'albédo de différentes surfaces terrestres et des nuages.....	26

Tableau 2.3	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'éclaircissement des nuages marins.....	28
Tableau 2.4	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'augmentation de l'albédo des terres cultivées et des prairies.....	30
Tableau 2.5	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'augmentation de l'albédo des milieux urbains.....	32
Tableau 2.6	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'augmentation de l'albédo des océans.....	34
Tableau 2.7	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par les miroirs réfléchissants dans l'espace.....	36
Tableau 2.8	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par la capture directe de CO ₂ dans l'air et son stockage.....	40
Tableau 2.9	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par la bioénergie avec capture et stockage de carbone.....	42
Tableau 2.10	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par le boisement/reboisement.....	45
Tableau 2.11	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'emploi du biochar.....	48
Tableau 2.12	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par la fertilisation des océans.....	50
Tableau 2.13	Résumé du potentiel d'atténuation des CC par altération des roches silicatées dans les terres et océans.....	52
Tableau 3.1	Résumé des opinions des participants au sondage <i>Experiment Earth</i> à propos de certaines technologies de géo-ingénierie.....	63
Tableau 3.2	Exemple d'opinion du public envers différents critères qui pourraient influencer l'acceptation sociale de la géo-ingénierie pour compenser les CC.....	65
Tableau 4.1	Pré-évaluation des technologies de retrait de CO ₂ atmosphérique selon le temps de déploiement à grande échelle et le contrôle temporel.....	68
Tableau 4.2	Pré-évaluation des technologies de gestion de radiations solaires selon le temps de déploiement à grande échelle et le contrôle temporel.....	69
Tableau 4.3	Synthèse des caractéristiques principales des technologies de retrait du CO ₂ atmosphérique.....	71
Tableau 4.4	Critères utilisés dans l'analyse comparative des technologies de géo-ingénierie.....	72
Tableau 4.5	Code des technologies de géo-ingénierie utilisées pour l'analyse multicritère.....	72
Tableau 4.6	Pondération pour chaque critère d'analyse multicritère.....	73
Tableau 4.7	Résultats de l'analyse comparative des technologies de géo-ingénierie étudiées.....	74

Tableau 4.8	Résultats de la dimension environnement.....	75
Tableau 4.9	Résultats de la dimension sociale.....	77
Tableau 4.10	Résultats de la dimension économique.....	80

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AR	Technologie de boisement/reboisement
BECCS	Technologie de bioénergie avec capture et stockage de carbone
CC	Changements climatiques
CCN	Noyaux de condensation dans les nuages
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CCS	Capture de carbone et son stockage
CCU	Capture de carbone et son utilisation
CDB	Convention des Nations Unies sur la Biodiversité
CH ₄	Méthane
CNUDM	Convention des Nations Unies sur le droit de la mer
CO ₂	Dioxyde de carbone
COMEST	Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies
COP21	21 ^e Conférence des parties sur les changements climatiques organisée à Paris
COV	Composés organiques volatils
DACCS	Technologie de capture directe de CO ₂ et son stockage
EASAC	<i>European Academies Science Advisory Council</i>
ECCC	Environnement et changement climatique Canada
EJ	Exajoule, unité de mesure de l'énergie
EW	Technologie de stimulation de l'altération des roches
FA	Facteurs anthropiques
FO	Technologie de fertilisation des océans
FR	Forçage radiatif
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GRS	Gestion des radiations solaires
Gt	Gigatonne
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
K	Unité de système international de la température kelvin
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
Mha	Millihectares
MR	Matières résiduelles

N ₂ O	Protoxyde d'azote ou oxyde nitreux
OMM	Organisation météorologique mondiale
SO ₂	Dioxyde de soufre
SPEDE	Système de plafonnement et d'échange de droit d'émission
Tg	Téragramme
TJ	Térajoule, unité de mesure d'énergie
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
UNFCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
USGAO	<i>United States Government Accountability Office</i>
µm	Micromètre
W m ⁻²	Watts par mètre carré

INTRODUCTION

Les changements climatiques (CC), générés par l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) de source anthropique dans l'atmosphère, font partie des défis les plus critiques de l'environnement planétaire qui nécessitent des efforts internationaux pour les atténuer. Les causes des impacts des GES sur le climat font l'objet d'un consensus parmi les scientifiques et plusieurs politiciens. En plus de la hausse de la température moyenne de la Terre, depuis l'époque préindustrielle, plusieurs autres indicateurs le démontrent de façon notable et avec quasi-certitude. Ces impacts se font déjà sentir partout dans le monde et pourraient s'intensifier selon les études scientifiques et les scénarios climatiques. (Ouranos, 2015; Warren et Lemmen, 2014; Woelders et al., 2018)

Face à cette réalité, l'accord de Paris a stipulé qu'une diminution des GES à l'échelle planétaire exige une contribution importante et concertée de chaque pays dans l'ensemble des continents. Il a donc recommandé de limiter la hausse de la température terrestre, d'ici la fin du siècle, d'au plus 2 degrés (°C) par rapport à son niveau préindustriel. Il a même incité les États de restreindre cette hausse plutôt à 1,5 °C pour éviter ou minimiser au maximum les impacts irréversibles des CC (*United Nations Framework Convention on Climate Change* [UNFCCC], 2015). C'est un événement qui a eu un succès notable, car il a donné un cadre pour l'atténuation de GES pour les 174 pays signataires. Toutefois, il n'a pas précisé les moyens pour atteindre les cibles de réduction de GES, et il a été peu contraignant pour les grands émetteurs de carbone.

Les bilans récents des émissions de GES indiquent que plusieurs pays n'ont pas diminué de manière satisfaisante leurs GES malgré les efforts qu'ils ont menés jusqu'à présent. Par exemple, en 2016, les émissions totales de GES du Canada s'élevaient à 704 mégatonnes d'équivalent en dioxyde de carbone (CO₂). Elles n'ont baissé que de 3,8 % par rapport à leur niveau en 2005 (Environnement et Changement climatique Canada [ECCC], 2018a). De plus, comparées aux autres États, les émissions de GES par habitant au Canada (20,1 tonnes équivalentes de CO₂) étaient similaires à celles des États-Unis (20,8). Ces mêmes émissions du Canada étaient nettement supérieures à celles de divers pays comme la France (6,9), le suède (5,5) et l'Union européenne (8,5) (Gouvernement du Québec, 2018).

De ce fait, les GES générés par chaque nation continueront de s'accumuler dans l'atmosphère si aucun effort d'atténuation plus poussé n'est effectué selon les prévisions futures (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2014a). Dans ce sens, d'ici la fin de siècle, le risque de dépasser le seuil de 2 °C de la température terrestre demeure élevé. En effet, une étude récente a établi que la hausse de la température devrait se situer entre 2 et 4,9 °C, avec une moyenne de 3,2 °C. D'après cette même étude, les chances pour limiter le réchauffement planétaire à 2 °C (1,5 °C) sont de 5 % (1 %) seulement d'ici la fin de siècle (Raftery, Zimmer, Frierson, Startz et Liu, 2017). D'autres chercheurs ont estimé aussi que l'atteinte du seuil de 2 °C ne serait pas réaliste, car cela occasionnerait des coûts sociaux et environnementaux très élevés (Fuss et al., 2016).

Actuellement, les mesures d'atténuation de GES menées par les états semblent être insuffisantes pour respecter les objectifs ambitieux de l'accord de Paris. Les technologies innovantes de la géo-ingénierie sont perçues par certains scientifiques comme un outil potentiel pour contrer les CC. Elles comprennent plusieurs approches qui offrent une modification artificielle du climat pour limiter les CC. Ces technologies sont classées selon deux buts principaux : la réduction du niveau du CO₂ dans l'air, et la diminution des rayons solaires qui atteignent la surface terrestre (Caldeira, Bala, et Cao, 2013; Ying et Yuan, 2017). Ceci dit, l'article 4 de l'accord de Paris a évoqué la géo-ingénierie comme mesure potentielle pour atténuer les GES à long terme : « les absorptions anthropiques par les puits de GES au cours de la deuxième moitié du siècle » (UNFCCC, 2015). De même, certaines approches de géo-ingénierie ont fait partie des pistes éventuelles explorées lors du dernier rapport de GIEC pour contrer les CC (GIEC, 2018a). Cependant, peu est connu sur l'efficacité la plus réaliste de ces approches, les facteurs qui limitent leur déploiement, et leurs risques possibles sur l'environnement.

La géo-ingénierie soulève beaucoup d'intérêt et de débat parmi les citoyens, les scientifiques et les politiciens en raison de son risque éventuel sur l'environnement, et ses enjeux sociaux, politiques et éthiques (Dilling et Hauser, 2013; Gupta, 2016; Varet, 2014). Certaines opinions accréditent la thèse selon laquelle la géo-ingénierie pourrait retarder et désavantager la transition mondiale vers l'utilisation des énergies propres (*Geoengineering Monitor*, s. d.). Par ailleurs, certaines approches de géo-ingénierie semblent avoir un potentiel prometteur pour atténuer les GES, et plus d'acceptabilité sociale. Elles concernent en particulier l'emploi du biochar et la capture directe de CO₂ à partir de l'air ambiant. Le biochar est un charbon riche en carbone issu de la combustion de résidus de biomasse végétale en absence d'oxygène. L'application du biochar au sol permettrait la séquestration du carbone dans le sol pendant des siècles ou des millénaires (Husk et Major, s. d.; Wang, Xiong et Kuzyakov, 2016). Cela pourrait donc réduire les impacts des changements climatiques. La technologie de capture directe de CO₂ à partir de l'air ambiant a été qualifiée d'incontournable pour limiter la hausse de la température terrestre à 1,5 °C d'ici 2100 si les négociations internationales échouent dans l'atteinte de leurs engagements en vertu de l'accord de Paris (Fuss et al., 2016). Pourtant, plusieurs technologies de géo-ingénierie ne sont pas suffisamment développées pour leur application à grande échelle, et certaines d'entre elles sont encore au stade recherche ou expérimentale (*European Academies Science Advisory Council [EASAC]*, 2018; Zevenhoven et Fält, 2018).

Dans cette optique, l'objectif principal de cet essai est d'évaluer l'état d'avancement, l'efficacité, et les effets secondaires potentiels de la géo-ingénierie lorsque déployée à grande échelle pour contrer les CC. Ce travail cherchera donc à déterminer si certaines technologies de géo-ingénierie pourraient compléter les efforts menés par les gouvernements pour atténuer les GES. En plus de l'objectif général susmentionné, ce projet visera aussi à mettre en évidence les technologies les plus favorables à l'égard de

l'environnement, l'économie et l'aspect social. Il permettra enfin d'évaluer les facteurs qui freinent l'utilisation à grande échelle la géo-ingénierie.

Pour y arriver, cet essai est divisé en cinq chapitres. Le premier dresse un portrait des efforts déployés pour atténuer les GES au Québec et au Canada. Il comporte donc plusieurs sections sur le profil des émissions de GES au niveau provincial et national, ainsi que les principales mesures adoptées par les gouvernements fédéral et québécois pour réduire les GES sur leur territoire. Le deuxième chapitre contient une définition de la géo-ingénierie, de même que ses avantages et ses risques potentiels. Un état d'avancement de ses différentes technologies sera aussi présenté dans ce chapitre. Toutes ces informations utilisées proviennent de sources diverses pertinentes et récentes. La majorité de ces sources sont obtenues par l'emploi des bases de données de l'université de Sherbrooke.

Le chapitre 3 comprend les principaux enjeux de la géo-ingénierie. Ces enjeux ainsi que les données du chapitre 2 serviront de base pour sélectionner les sphères et les critères nécessaires pour effectuer l'analyse multicritère décrite dans le chapitre 4. Ainsi, ce dernier comporte une analyse comparative des technologies de géo-ingénierie pour déterminer leur potentiel d'application comme mesure d'atténuation des CC. Les critères employés pour cette analyse seront inspirés également de certains outils de développement durable fondés sur les volets environnementaux, économiques et sociaux. Les résultats obtenus permettent d'évaluer les effets secondaires éventuels, et les facteurs qui limitent leur usage à grande échelle. Ils offrent de même la possibilité de distinguer les technologies les plus avantageuses vis-à-vis de l'environnement, l'économie et l'aspect social. Quant au cinquième chapitre, il propose différentes recommandations pour intégrer certaines approches de la géo-ingénierie comme mesure de lutte contre les CC. Une attention particulière est accordée à celles qui auront le moins d'impacts négatifs, et qui auront démontré leur utilité lors des projets pilotes au laboratoire ou sur le terrain. En enfin, une conclusion est présentée comme dernière section.

1 EFFORTS D'ATTÉNUATION DES GES AU QUÉBEC ET AU CANADA

Ce premier chapitre vise à évaluer les principales mesures adoptées par les gouvernements du Québec et du Canada pour réduire les émissions de GES. Tout d'abord, avant de présenter ces efforts, un rappel du forçage radiatif induit principalement par les activités humaines et qui perturbe l'équilibre du système climatique est brièvement abordé. Ensuite, sont résumées les grandes lignes de l'Accord de Paris, ainsi qu'un portrait le plus récent du niveau global de GES produits au Québec et au Canada.

1.1 Contribution du forçage radiatif (FR) anthropique au réchauffement planétaire

Le FR, exprimé en watt par mètre carré, quantifie la variation de flux énergétique, au sein du système terrestre, causée par des facteurs anthropiques ou naturels. Ainsi, il concerne la différence entre l'énergie radiative reçue et celle émise vers l'espace par le système Terre-atmosphère. Lorsque ce système reçoit plus d'énergie radiative du soleil qu'il n'en dissipe, le FR est positif. Par contre, le FR est négatif lorsque ce système renvoie plus d'énergie qu'il n'en reçoit. (GIEC, 2014a; Vives, 2013)

Depuis la période préindustrielle, les croissances économique et démographique ont donné lieu à la libération dans l'atmosphère d'une quantité abondante de GES générés par l'usage de combustibles fossiles comme principale source d'énergie. La persistance et l'accumulation de ces gaz dans la troposphère provoquent un FR positif qui mène à une augmentation significative de la température terrestre par un effet de serre accentué. En effet, la surface de la planète s'expose à un réchauffement lors d'un FR positif, et à un refroidissement quand le FR est négatif.

Historiquement, les études de la variation de la température moyenne mondiale au-dessus des terres émergées et des océans indiquent un réchauffement de 0,85 °C depuis 1880 jusqu'à 2012 (GIEC, 2013). La figure 1.1 montre, pour la période de 1951 à 2010, la contribution à la hausse de la température des facteurs anthropiques responsables de l'émission de GES, ainsi que d'événements naturels comme l'éruption volcanique. Ces données révèlent une similitude entre la contribution humaine représentée par le forçage anthropique et le réchauffement planétaire observé pour la même époque (GIEC, 2014a). Cela souligne que le FR anthropique a été la principale cause des CC, alors que la part des processus naturels à ce phénomène a été négligeable.

De même, le FR global en 2011 a été positif d'environ 2,29 W m⁻², et a connu une augmentation significative depuis 1950 (0,57 W m⁻²) (figure 1.2). Parmi les GES, le CO₂ représente le facteur qui a une contribution majeure à ce FR. En effet, les émissions de CO₂ à elles seules ont induit un FR de 1,68 W m⁻², alors que les autres GES (N₂O, CH₄ et hydrocarbures halogénés) ont produit un FR moins élevé qui varie entre 0,17 et 0,97 W m⁻². (GIEC, 2013)

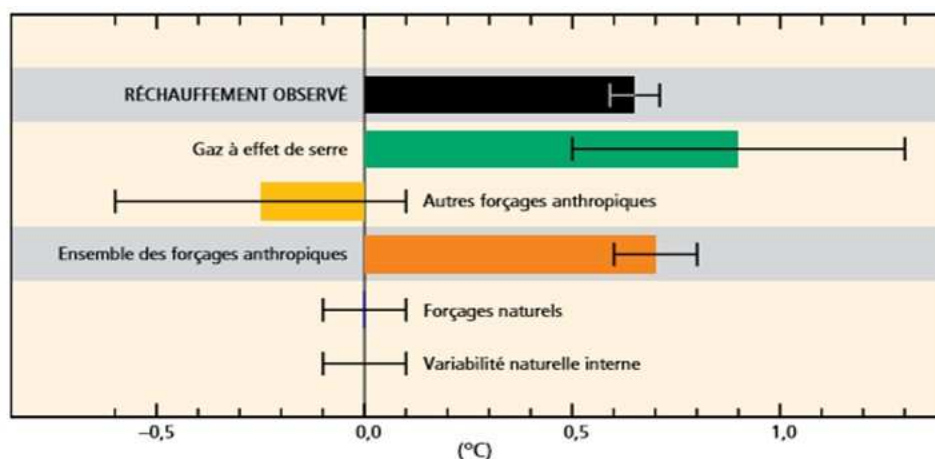


Figure 1.1 Contribution des facteurs anthropiques et naturels au changement observé de la température globale de la Terre entre 1951 et 2010 (tiré de : GIEC, 2014a, p. 6)

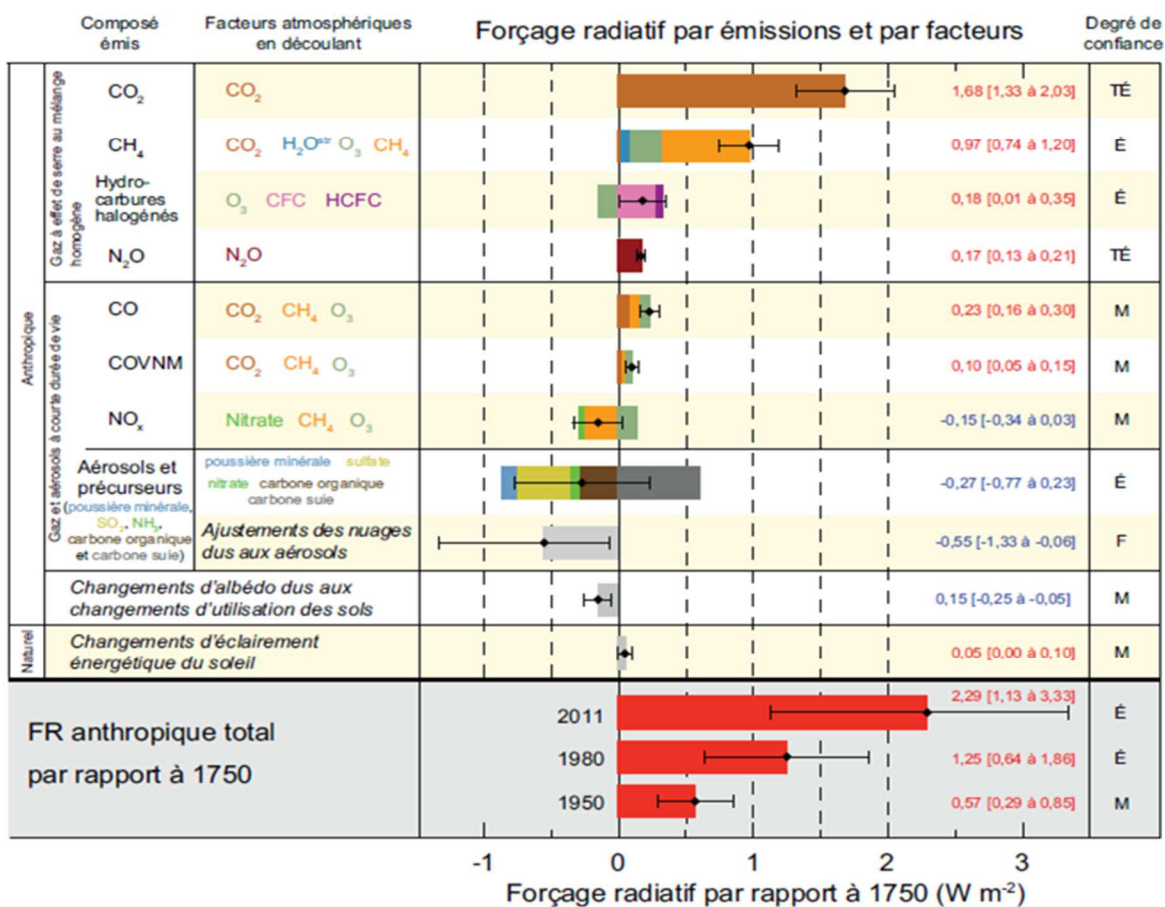


Figure 1.2 Forçage radiatif en 2011 par rapport à 1750 causé par les GES et des processus naturels (tiré de : GIEC, 2013, p. 12) (très élevé : TÉ; élevé : É; moyen : M; faible : F)

Les impacts des CC sont déjà ressentis au Canada et à l'étranger. Les modifications observées de la température et des précipitations ont engendré des effets significatifs sur l'augmentation des canicules, des inondations, le dégel du pergélisol, la diminution de la couverture neigeuse, et la hausse du niveau de mer. Les prévisions futures indiquent que ces impacts pourraient s'amplifier dans les prochaines années. (GIEC, 2014b; Lemmen, Warren, James et Mercer Clarke, 2016; Warren et Lemmen, 2014)

Ces changements susmentionnés comprennent des risques importants pour la santé humaine, les infrastructures, la croissance économique et les milieux naturels. Face à cette réalité, les gouvernements fédéral et québécois ont mis en place des mesures, des politiques et des plans d'action afin d'abaisser les émissions de GES, et pour s'adapter aux répercussions des CC. Mais, des efforts plus poussés sont encore nécessaires pour trouver des solutions efficaces qui permettraient d'atteindre les cibles de réduction des émissions de GES définies dans le cadre de l'Accord de Paris.

1.2 Rôle de l'accord de Paris dans la lutte contre les CC

Adopté le 12 décembre 2015, l'accord de Paris a été élaboré pour donner suite aux négociations de la conférence de Paris sur le climat (COP21) de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les CC [CCNUCC]. C'est le premier accord international dans lequel 195 pays ont accepté de réunir leurs efforts pour lutter contre les CC et s'adapter à leurs effets. Il est le résultat de plusieurs années de tractations organisées dans le cadre de la CCNUCC (Gouvernement du Canada, 2016a).

L'objectif global de cet accord a été d'accélérer les efforts planétaires nécessaires pour maintenir la température mondiale en dessous de 2 °C d'ici l'an 2100 par rapport à son niveau préindustriel (période de référence 1861 à 1880). D'ailleurs, l'accord incite les États signataires à mener des mesures plus solides pour limiter cette température à 1,5 °C, car cela permettrait d'éviter ou minimiser au maximum les impacts irréversibles des CC (UNFCCC, 2015). Ce dernier seuil a été justifié, entre autres, par le risque élevé de la remontée du niveau des océans qui menace certains pays comme le Canada et plusieurs états insulaires vulnérables (Lemmen et al., 2016).

De plus, l'accord encourage les acteurs non étatiques (villes, entreprises privées, experts scientifiques, société civile, collectivités, etc.) de participer à la lutte contre les CC. Dans ce but, il les invite à soutenir des projets d'atténuation des émissions de GES, et de contribuer aux renforcements de la résilience aux impacts des CC. Par ailleurs, l'accord ne définit pas d'objectifs contraignants pour les pays signataires, ce qui le distingue du protocole de Kyoto. (UNFCCC, 2015) En ce sens, chaque état a élaboré ces cibles de réduction de GES pour 2025 ou 2030, et aucune sanction n'a été envisagée en cas de non-respect de ses engagements par un pays particulier. Mais, dans cette situation, ce dernier pourrait subir une certaine pression politique, médiatique ou encore sociétale.

1.2.1 Engagement des pays signataires

Au-delà de l'objectif principal mentionné plus haut, les pays ont convenu aux principaux engagements suivants (UNFCCC, 2015; Gouvernement du Canada, 2016a) :

- Définir des cibles de réduction des émissions de GES pour 2020 ou 2030, et parvenir après à une baisse rapide de ces émissions qui permettrait d'atteindre la neutralité de carbone comme signifié dans l'article 4 de l'accord.
- Effectuer un bilan mondial lors des réunions périodiques tous les cinq ans à partir de 2023. Ces rencontres permettront d'évaluer l'état d'avancement collectif réalisé à cette date, et de mettre à jour les contributions nationales de chaque pays.
- Donner réciproquement les informations suivantes : les émissions de GES, les progrès accomplis pour atteindre les cibles d'émissions, les mesures adoptées pour l'adaptation aux CC, et l'octroi ou la réception de soutien financier. Ces informations devront également être communiquées au public pour favoriser la transparence et la responsabilisation comme indiqué dans l'article 4 de l'accord.
- Consolider les efforts de résilience et d'adaptation aux impacts des CC comme cité dans l'article 7 de l'accord. En effet, ce dernier encourage les pays signataires de mettre en place des stratégies d'accommodation aux CC.
- De plus, comme mentionné dans les articles 3 et 9 de l'accord, les pays développés fourniront une aide financière aux pays en développement pour les assister dans leur acclimatation aux CC, et à bâtir une économie propre.
- Reconnaître et respecter les droits des peuples autochtones, les communautés locales, les droits de la personne et l'égalité des sexes lors de l'adoption des mesures ou des politiques pour lutter contre les CC.

1.3 Portrait des émissions de GES au Québec et au Canada

La figure 1.3 représente les émissions de GES par province et territoire au Canada. Le niveau de ces émissions montre une variation notable selon les provinces, car il dépend de plusieurs facteurs, dont l'activité économique, la démographie et la nature de la source d'énergie employée dans chaque région.

En général, les provinces les plus denses en population, et qui utilisent les combustibles fossiles comme principale source d'énergie, ont un profil plus important d'émission de GES. En ce sens, l'Alberta et l'Ontario représentent les provinces qui ont le plus fort niveau d'émissions de GES au Canada. Elles sont suivies par le Québec, la Saskatchewan et la Colombie-Britannique (figure 1.3). Toutefois, depuis 2005, l'Alberta et l'Ontario montrent une tendance différente. En effet, les émissions de l'Alberta ont augmenté de 14 % entre 2005 et 2016 à cause de l'accroissement des activités gazières et pétrolières. Par contre, pour cette même période, les émissions de l'Ontario ont baissé de 22 % en raison de la fermeture de centrales électriques

alimentées au charbon. En 2016, les GES combinés et émis par ces deux dernières provinces atteignent 60 % du total national du Canada, soit 37 % (Alberta) et 23 % (Ontario). Les provinces du Québec et de la Colombie-Britannique ont une tendance similaire d'émission de GES qui montre une légère diminution de 11 % et 5,1 %, respectivement, depuis 2005 à 2016 (tableau 1.1). (ECCC, 2018b)

En ce qui concerne la Saskatchewan, ses émissions ont grimpé de 11 % entre 2005 et 2016 probablement à cause du développement des activités de l'industrie pétrolière et gazière, de l'extraction minière et des transports. Une évolution similaire est remarquée depuis 2005 pour les émissions du Manitoba et de Terre-Neuve-et-Labrador, mais cette hausse a été très faible d'environ 3,5 % et 8,7 %, respectivement. De plus, la Nouvelle-Écosse, le Nouveau-Brunswick et l'Ontario représentent les provinces qui ont eu des baisses les plus importantes de leurs émissions de l'ordre de 33 %, 24 % et 22 %, respectivement pour la période 2005 à 2016. (tableau 1.1, ECCC, 2018b)

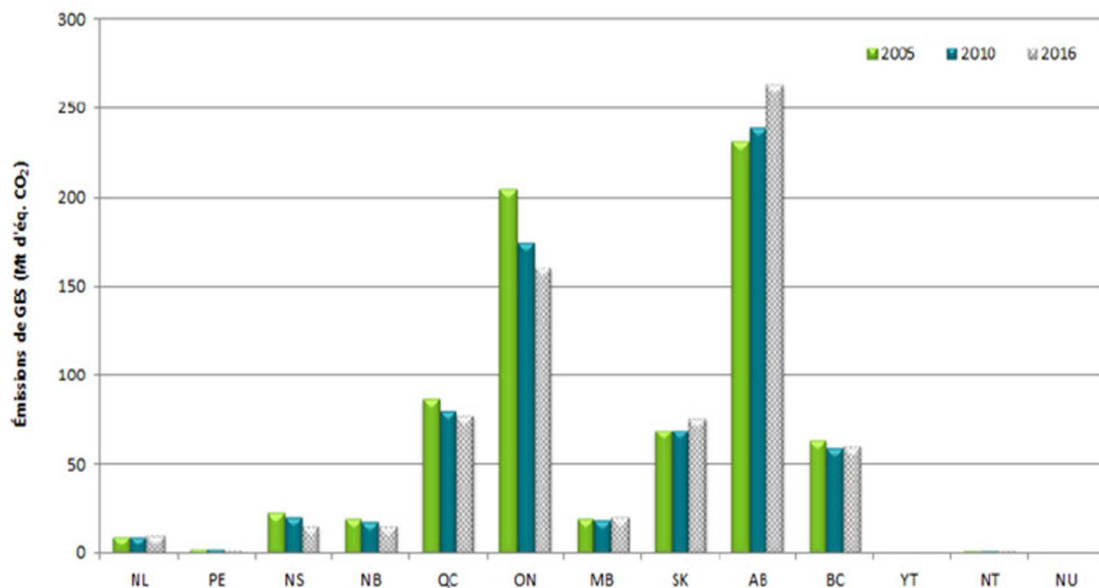


Figure 1.3 Les émissions de GES par les provinces canadiennes en 2005, 2010 et 2016 (tiré de : ECCC, 2018b, p. 14)

Par ailleurs, en 2015, les émissions de GES par habitant au Québec étaient d'environ 9,9 tonnes équivalentes de CO₂. Par contre, celles du Canada avaient une valeur plus grande, soit de l'ordre de 20,1 tonnes équivalentes de CO₂. Ces valeurs sont plus importantes que celles de l'Union européenne (8,5), la France (6,9) et le suède (5,5), mais inférieures à celles des États-Unis (20,8). (Gouvernement du Québec, 2018)

Au Québec, l'estimation des émissions de GES en 2016 par secteur d'activité montre une contribution majoritaire du secteur de transport à ces émissions, car celui-ci libère environ 43 % des émissions totales de la province (figure 1.4). Les émissions de GES qui proviennent des industries représentent 30,1 % et se

classent donc en deuxième rang. Elles sont suivies par celles du secteur résidentiel, commercial et institutionnel (10,8 %), l'agriculture (9,6 %), les matières résiduelles (6,2 %) et enfin l'électricité (0,3 %). (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2018). Les efforts d'atténuation des GES du Québec doivent de ce fait miser en premier lieu sur des mesures novatrices qui ont une forte incidence sur la diminution des GES dans les deux activités de transports et de l'industrie.

Tableau 1.1 Variation des émissions de GES par les provinces canadiennes en 2005, 2010 et 2016
(tiré de : ECCC, 2018b, p. 14)

Tableau S-4 Émissions de GES par province/territoire, années sélectionnées									
Émissions de GES (Mt d'éq. CO ₂)									Variation (%)
Année	1990	2005	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2005-2016
Total des GES (Canada)	603	732	700	707	716	716	714	704	-3,8 %
NL	9,3	9,9	10,0	9,4	9,4	10,4	10,6	10,8	8,7 %
PE	1,9	2,0	2,1	2,0	1,7	1,7	1,7	1,8	-10 %
NS	19,6	23,2	20,9	19,2	18,2	16,4	16,6	15,6	-33 %
NB	16,1	20,1	18,7	16,8	14,8	14,4	14,3	15,3	-24 %
QC	86,6	86,5	81,7	79,5	79,9	78,0	78,4	77,3	-11 %
ON	179,2	204,7	172,5	169,1	168,4	165,4	162,9	160,6	-22 %
MB	18,3	20,2	19,0	20,2	20,9	20,9	20,8	20,9	3,5 %
SK	44,7	68,9	69,0	71,3	74,0	77,4	79,5	76,3	10,7 %
AB	174,1	231,0	243,8	256,1	264,9	268,6	266,9	262,9	14 %
BC	51,1	63,3	59,3	60,3	60,9	60,4	59,4	60,1	-5,1 %
YT	0,5	0,5	0,7	0,7	0,6	0,4	0,5	0,4	-19 %
NT	S.O.	1,6	1,4	1,5	1,4	1,5	1,7	1,6	3 %
NU	S.O.	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	58 %
Notes :									
1. Les chiffres ayant été arrondis, leur somme peut ne pas correspondre au total indiqué.									
2. S.O. Sans objet.									

L'estimation des émissions de GES pour l'ensemble du Canada indique que ce sont les deux secteurs de pétrole et gaz (26 %), et de transport (25 %) qui produisent la quantité la plus importante de GES du pays. Ils sont suivis par les émissions du secteur de construction (12 %), des industries (11 %) et de l'électricité (11 %). Les matières résiduelles viennent en dernier lieu, car elles ne génèrent que 6 % des émissions du Canada (figure 1.5) (ECCC, 2018b). Le gouvernement fédéral devrait donc encourager tous les provinces et territoires du Canada à réduire davantage les GES engendrés par chacun de ces secteurs, à l'exception des matières résiduelles qui ont une faible contribution aux GES.

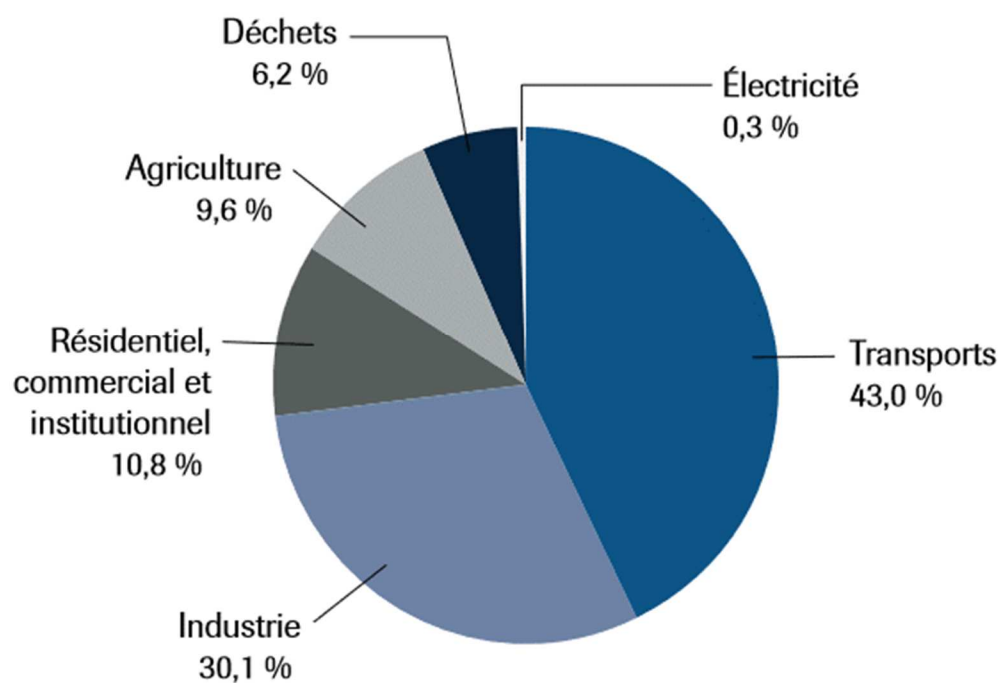


Figure 1.4 Répartition des émissions de GES au Québec en 2016 par secteurs d'activité (tiré de : MDDELCC, 2018, p. 7)

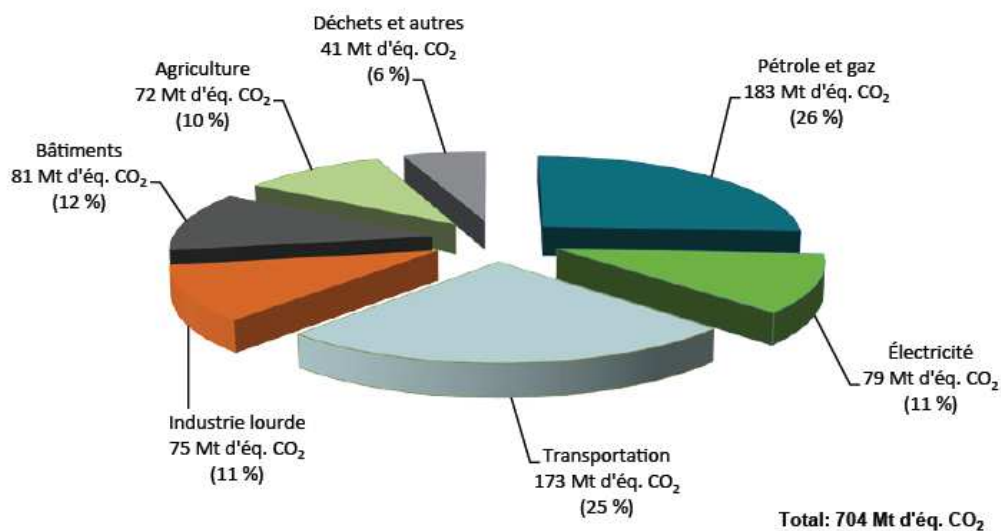


Figure 1.5 Répartition des émissions de GES au Canada en 2015 par secteurs d'activité (tiré de : ECCC, 2018b, p. 13)

1.4 Efforts d'atténuation des GES du gouvernement de Québec

Le gouvernement du Québec s'est impliqué de manière précoce dans la lutte contre les CC, et ce bien avant l'accord de Paris. En effet, il a élaboré un plan d'action sur les CC [PACC] de 2006-2012 qui a été publié en juin 2006. Il s'est engagé d'agir simultanément sur les deux enjeux : la réduction de ses émissions de GES à la source et l'amélioration de sa résilience face aux répercussions des CC. Pour ces raisons, il a mis en place une approche intégrée basée sur deux outils. Le premier est le PACC de 2013-2020 qui a été rendu public en 2012. Le deuxième concerne le système de plafonnement et d'échange de droit d'émission (SPEDE) qui a débuté ses activités en janvier 2013 (Gouvernement du Québec, 2018). De plus, il s'est impliqué dans des ententes internationales d'atténuation des CC comme l'accord de Paris.

Pour suivre les directives de l'accord de Paris, le gouvernement a fixé deux cibles de réductions des émissions de GES à court et moyen terme pour la province du Québec. En effet, à l'horizon de 2020, la cible retenue a été de baisser les émissions de GES de 20 % par rapport à leur niveau en 1990 (MDDELCC, 2015). Par contre, trois cibles de réduction sont examinées pour 2030, soit une atténuation de 35 %, 37,5 % ou 40 % relativement à 1990. Pour poursuivre ses efforts à long terme, le Québec s'est engagé à diminuer ces émissions de 80 à 95 % d'ici 2050 (figure 1.6, MDDELCC, 2015). L'atteinte de ces différentes cibles ambitieuses nécessite donc une diminution continue et progressive des émissions de GES dans les prochaines années.

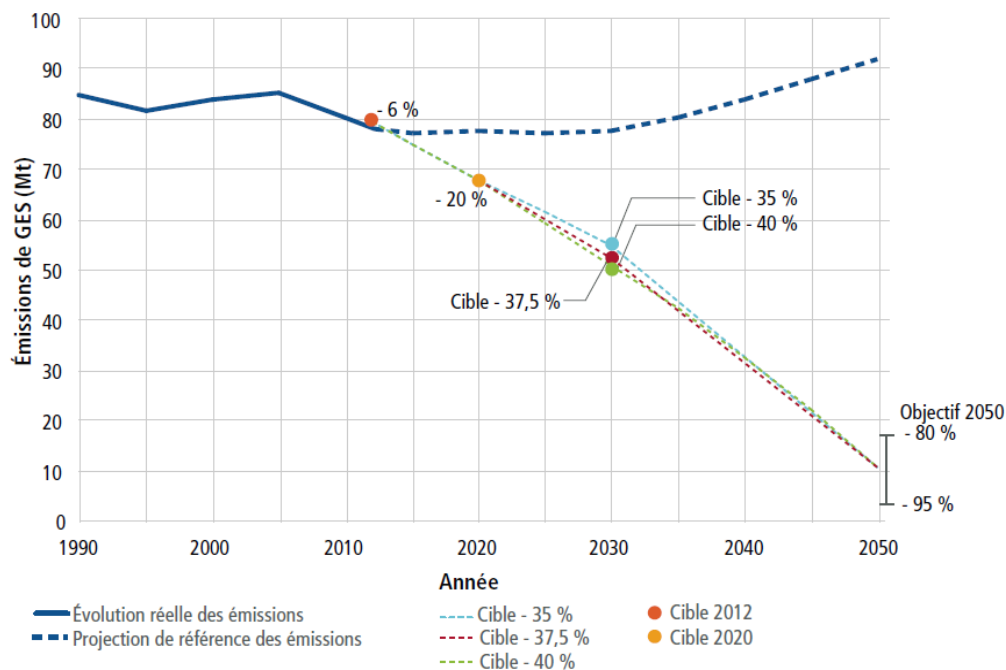


Figure 1.6 Évolution des émissions de GES au Québec et cibles de réduction (tiré de : MDDELCC, 2015, p. 31)

1.4.1 Plan d'action 2013-2020 sur les CC

Le plan d'action 2013-2020 sur les CC précise un ensemble de programmes et initiatives élaborés par le gouvernement québécois pour réduire les émissions de GES ou pour préparer l'adaptation des citoyens aux conséquences des CC (figure 1.7). Ainsi, les revenus qui proviennent du SPEDE sont versés dans le fond vert pour financer les programmes et initiatives de ce plan. De cette façon, le gouvernement pourrait soutenir les entreprises et les municipalités dans leur transition vers une voie à faible émission de carbone. Globalement, le plan vise 30 priorités qui ont abouti à identifier plus de 150 actions potentielles gérées par 14 ministères et organismes du gouvernement québécois. Les programmes de ce plan appartiennent aux secteurs suivants : l'énergie, le transport, la recherche et l'innovation, les matières résiduelles, l'agriculture, la réhabilitation des sols contaminés, la coopération climatique internationale, et le partenariat et l'exemplarité de l'État. (MDDELCC, 2012) Ces programmes susmentionnés présentent les objectifs ci-après (MDDELCC, 2012) :

- Favoriser le développement des transports en commun et actif;
- Diminuer l'utilisation de combustibles fossiles;
- Stimuler l'électrification des transports;
- Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, des procédés industriels et des flottes des véhicules;
- Élargir l'emploi d'énergie renouvelable dans tous les secteurs d'activité économique du Québec;
- Promouvoir les technologies propres et en particulier la recherche et le développement dans ce domaine

En résumé, le plan d'action 2013-2020 comprend les caractéristiques suivantes (Gouvernement du Québec, 2018) :

- Le plan d'action s'applique à l'ensemble des activités économiques du Québec y compris ceux visés par le SPEDE et ceux non couverts par celui-ci;
- Il offre un accompagnement aux entreprises et citoyens dans la lutte contre les CC;
- Il favorise la transition vers une économie verte;
- Enfin, le plan d'action comprend des mesures d'adaptation aux CC. Cela concerne des initiatives liées à la résilience des infrastructures, et d'amélioration des connaissances sur les impacts des CC sur l'environnement et les communautés

1.4.2 Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission

Pour réduire davantage ces émissions de GES, le Québec a élaboré le 1^{er} janvier 2013 un SPEDE. Ce dernier fonctionne selon le principe d'un marché de carbone dans lequel sont échangés des droits

d'émissions pour émettre une quantité définie de GES. Il cible les organisations qui produisent 25 kilotonnes d'équivalent de CO₂ ou plus par année. Durant sa première phase de sa mise en œuvre (2013 à 2014), seuls les secteurs de l'électricité et de l'industrie ont été assujettis par ce système. Néanmoins, dès 2015, les distributeurs de carburants et de combustibles fossiles, de même que les secteurs de transport et des bâtiments l'ont été aussi. (MDDELCC, s. d.a) De cette manière, ce marché devrait couvrir 80 % du total des émissions de GES générés au Québec par les secteurs ci-après : transport, industries, commercial et institutionnel, production d'électricité, et résidentiel (Gouvernement du Québec, 2018).

Par ailleurs, le niveau annuel de plafonnement des émissions de GES serait élaboré en diminuant sa valeur au fil des temps pour atteindre les cibles de réduction visées. Pour assurer leur conformité au SPEDE, les entreprises assujetties ont deux options soit d'acheter des droits d'émissions par le marché de carbone ou améliorer leur performance opérationnelle pour baisser leurs émissions. Ces droits d'émissions acquis par une entreprise donnée doivent être équivalents à son niveau de GES libérés dans l'atmosphère. Ils peuvent être obtenus de la manière suivante : les ventes aux enchères organisées par le gouvernement, les acheter via d'autres participants ou encore acheter des crédits compensatoires chez des promoteurs de projets approuvés par le gouvernement (MDDELCC, s. d.b; c). Les revenus collectés par ce système sont versés au Fonds vert pour financer le plan d'action 2013-2020 sur les CC, comme illustré dans la figure 1.7.

1.4.3 Autres mesures du gouvernement en lien avec la lutte contre les CC

Le gouvernement a mis en place plusieurs autres mesures dont le but principal n'est pas la lutte contre les CC, mais qui contribueraient également aux efforts d'atténuation des CC. En effet, ces stratégies pourraient favoriser la réduction des émissions de GES ou l'adaptation aux impacts des CC (figure 1.8; Gouvernement du Québec, 2018). Les outils qui pourraient contribuer à la réduction des émissions de GES concernent les exemples suivants :

- La loi sur la qualité de l'environnement qui prend en compte les émissions de GES et l'adaptation au CC lors de l'attribution des autorisations gouvernementales;
- La loi sur le développement durable qui favorise l'emploi des énergies renouvelables, un aménagement durable du territoire, et une mobilité à faible émission de GES;
- La stratégie maritime qui vise, en outre, à baisser les émissions de GES par le transport maritime, et à soutenir la communauté côtière;
- La politique de gestion des matières résiduelles (MR) qui encourage, entre autres, les projets de biométhanisation et compostage, le recyclage, la récupération et la valorisation des déchets ce qui contribue à réduire les émissions de GES dans les sites d'enfouissement.

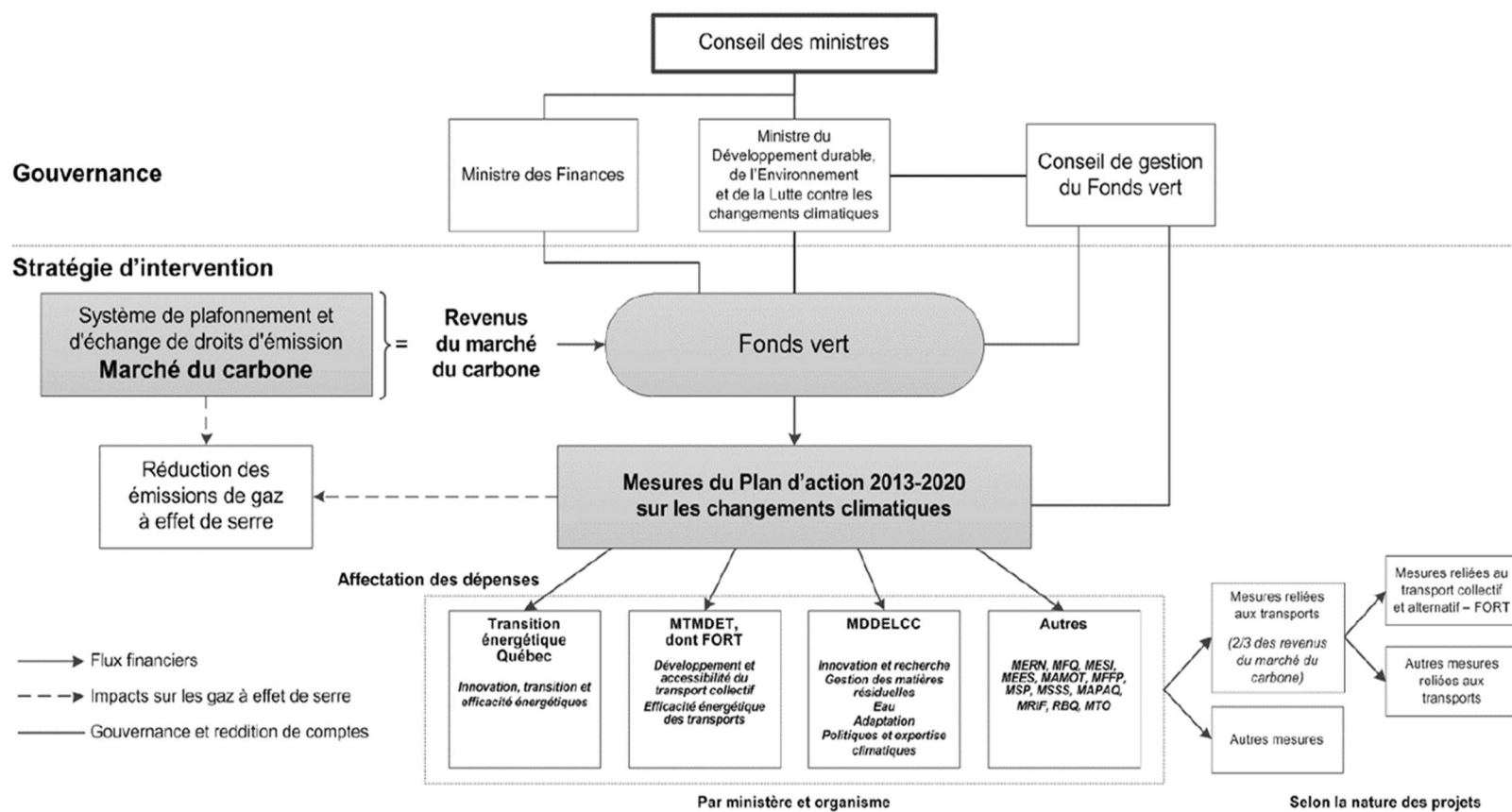


Figure 1.7 Illustration des mécanismes de lutte contre les CC au Québec (tiré de : Gouvernement du Québec, 2018, p. 67)

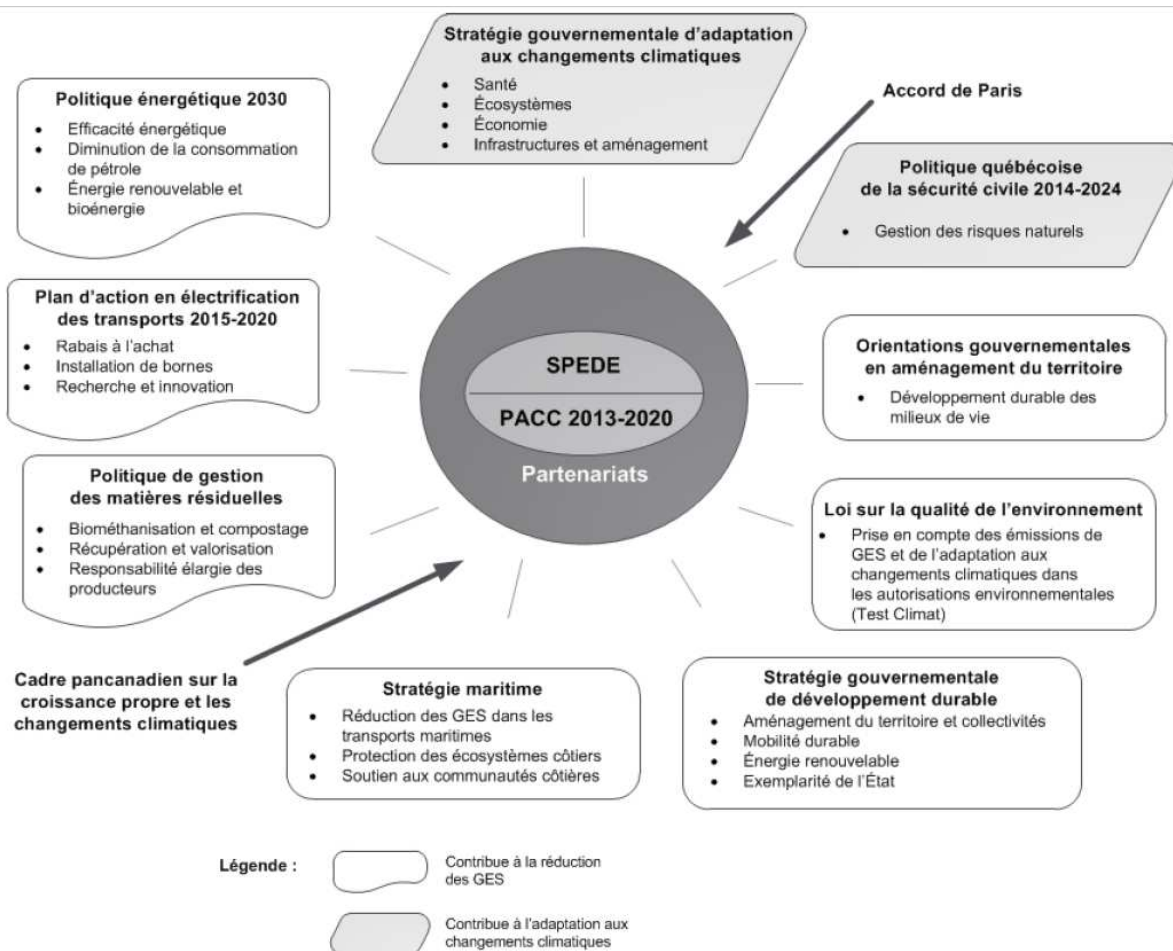


Figure 1.8 Illustration des différentes mesures en matière de lutte contre les CC au Québec (tiré de : Gouvernement du Québec, 2018, p. 18)

1.5 Efforts d'atténuation des GES du gouvernement fédéral

Pour contribuer à l'effort international de réduction des GES, le Canada a ratifié l'accord de Paris, et il s'est engagé à diminuer ses émissions de GES de 30 % par rapport à leur niveau de 2005 d'ici 2030. Pour faire suite à cet engagement, il a notamment organisé la Déclaration de Vancouver sur la croissance propre et les CC le 3 mars 2016. Cet événement visait en particulier d'élaborer des principes qui pourraient guider les gouvernements provinciaux vers un développement économique à faible émission en carbone. Il ciblait également l'amélioration des échanges potentiels entre les différentes provinces dans le cadre de la lutte contre les CC (Gouvernement du Canada, 2016b).

De plus, à la suite de la consultation des citoyens canadiens, le gouvernement fédéral et les autres gouvernements provinciaux et territoriaux du Canada ont établi le cadre pancanadien sur la croissance propre et les CC. Ce dernier constituerait un plan d'action global pour contrer les CC au pays. Ses objectifs

étaient d'atteindre la cible nationale de réduction de GES dans tous les secteurs économiques, et de favoriser une transition vers un avenir sobre en carbone (Gouvernement du Canada, 2016a). Le cadre pancanadien sur la croissance propre et les CC comprend quatre orientations suivantes :

- La tarification de la pollution par le carbone
- Les mesures complémentaires pour diminuer davantage les GES émis par les activités économiques
- Les approches d'adaptation aux effets des CC et la résilience
- Les stratégies pour promouvoir l'innovation et développer des technologies propres

1.5.1 Tarification de la pollution par le carbone

La tarification de la pollution par le carbone représente un élément important du cadre pancanadien sur la croissance propre et les CC. Elle devrait stimuler chez les entreprises et les consommateurs le choix des solutions ou alternatives à faibles émissions de carbone. Ainsi, le cadre pancanadien donne les directives d'un modèle pour la tarification de cette pollution qui devraient être adoptées jusqu'à 2018. Ce modèle a été conçu de manière à aider le Canada pour atteindre sa cible de réduction de GES, et devrait être intégré aux principales sources d'émissions de GES dans tout le pays. Il prévoit une augmentation progressive de la tarification au fil du temps pour diminuer les émissions de carbone, et ce avec un faible coût pour les entreprises et les consommateurs. (Gouvernement du Canada, 2016c)

De ce fait, les gouvernements des provinces et territoires canadiens avaient la possibilité jusqu'à 2018 de choisir l'outil pour adopter la tarification du carbone de la façon suivante (Gouvernement du Canada, 2016c) :

- Un système explicite basé sur les tarifs par une taxe (ou redevance) sur le carbone ou un système d'émission qui s'appuie sur le rendement
- Un système de plafonnement et d'échange des droits d'émission similaire à celui du Québec

Par ailleurs, après 2018, toute province qui n'aura pas intégré un des deux systèmes se verra imposer un prix pour la taxe carbone de la part du gouvernement fédéral. Plusieurs provinces canadiennes ont déjà adopté un outil de tarification de la pollution par le carbone. Par exemple, la Colombie-Britannique a mis en place une taxe sur le carbone. Tandis que, l'Alberta a adopté un système mixte qui comprend la redevance sur le carbone et le système basé sur le rendement pour les industries qui ont une forte émission de GES. (Gouvernement du Canada, 2016c)

1.5.2 Mesures complémentaires à la tarification de la pollution par le carbone

En plus de la tarification, le cadre pancanadien contient également plusieurs autres outils qui pourraient contribuer à réduire les GES générés par les différents secteurs économiques du pays. Par exemple, le

gouvernement fédéral vise à élargir l'emploi de l'électricité produite via des sources d'énergie renouvelable et non émettrice. Il incite les projets de transition vers des carburants à faibles teneurs en carbone. De plus, il espère également l'élimination graduelle des centrales thermiques alimentées au charbon dans tout le pays d'ici 2030. Il envisage de même une diminution de la consommation d'énergie par la mise en place des normes plus sévères en matière d'efficacité énergétique. Cela pourrait pousser les consommateurs de faire un changement dans leurs modes de vie et de réaliser en même temps des économies en utilisant moins d'énergie. (ECCC, 2018b)

En ce qui concerne l'environnement bâti, le gouvernement espère l'élaboration et la mise en place dès 2020, des codes plus stricts pour encadrer la construction des infrastructures urbaines et de bâtiments pour les rendre plus écoénergétiques. Ces codes ont pour objectif de faire en sorte que l'ensemble des provinces et territoires adopteront dès 2030 un code de construction à consommation énergétique nette zéro. Il examine également la possibilité de moderniser les bâtiments existants pour augmenter leur résilience aux effets des CC. (ECCC, 2018b)

Quant au secteur du transport, le gouvernement du Canada envisage d'adopter plusieurs mesures pour atténuer les émissions de GES dans ce secteur. Par exemple, il vise la création de normes plus exigeantes pour encadrer les émissions de GES par les véhicules routiers, les moteurs et les embarcations marines. Il encourage l'emploi des carburants de remplacement pour le transport aérien, ferroviaire et maritime (ECCC, 2018b; Gouvernement du Canada, 2016b). Dans ce but, il envisage d'élaborer, en collaboration avec l'industrie aéronautique canadienne, un plan d'action du Canada pour réduire les émissions de GES qui proviennent de l'aviation (Transport Canada, 2015). De plus, il s'intéresse à l'électrification des véhicules à grande échelle, et ce par la création d'une stratégie nationale relative aux véhicules zéro émission. Enfin, la mise en place d'un cadre de planification du transport en commun constitue une autre mesure qui a été visée pour diminuer les GES générés par ce secteur. (Gouvernement du Canada, 2016c)

1.5.3 Mesures d'adaptation aux impacts des CC et le développement des technologies propres

Le cadre pancanadien vise également de consolider la résilience aux CC, et envisage des mesures pour préparer les citoyens canadiens à l'adaptation aux effets négatifs de ces changements. Les principaux outils prévus à cet égard concernent les aspects suivants (Gouvernement du Canada, 2016c) :

- Des investissements dans des infrastructures adéquates;
- L'accès à l'information scientifique pour tous les citoyens, et sa vulgarisation;
- La protection et l'amélioration de la santé et le bien-être des citoyens;
- La gestion et l'atténuation des dangers liés au CC et les risques de catastrophes;

- Un soutien aux régions vulnérables. Dans ce sens, une attention particulière est donnée aux peuples autochtones du Canada et des collectivités de la région du Nord, puisque ces derniers seraient très sensibles aux répercussions des CC

En dernier lieu, le cadre pancanadien envisage de tirer profits des avantages des technologiques avancées qui comportent l'innovation et la recherche. Il cible ainsi stimuler le développement des technologies propres et leur intégration dans plusieurs secteurs de l'économie canadienne, et en particulier dans l'exploitation minière, la foresterie et l'énergie (Gouvernement du Canada, 2016c). L'ensemble de ces mesures pourraient contribuer à créer des nouvelles opportunités plus efficaces pour diminuer les émissions de GES à l'échelle nationale.

2 DÉFINITION DE LA GÉO-INGÉNIERIE

Le terme géo-ingénierie a été utilisé, pour la première fois, dans la littérature scientifique par Marchetti (1976) lors de la publication de son article qui propose le stockage de CO₂ dans les fonds des océans après son retrait de l'atmosphérique. La géo-ingénierie a été définie par le GIEC (2014a) de la manière suivante : « un vaste ensemble de méthodes et de techniques fonctionnant à grande échelle, et qui visent à modifier délibérément le système climatique pour lutter contre les effets du changement climatique ». De ce fait, cette définition fait référence à des efforts de manipulation à grande échelle du climat de la Terre pour ralentir, et stabiliser la hausse de la température planétaire. Elle exclut les approches employées actuellement par certaines industries pour capter leurs émissions à concentrations élevées en CO₂ directement à la sortie de leurs cheminées, avant leur libération dans l'atmosphère (Bourg et Hess, 2010; Lawrence et al., 2018). Ainsi, les deux technologies, de captage de carbone et son stockage [CCS] ou sa réutilisation (CCU), appliquées à la source, ne font pas partie des technologies traitées dans cet essai (figure 2.1).

Les technologies de géo-ingénierie sont regroupées en deux catégories (figure 2.1). La première vise à contrer le réchauffement planétaire par la diminution du niveau de CO₂ atmosphérique, et son stockage dans des réservoirs de carbone à long terme. Le CO₂ stocké de cette façon ne participerait pas à l'effet de serre. Cette catégorie de technologies permettrait de capter le CO₂ dans l'air ambiant indépendamment de leurs sources d'émission. La deuxième catégorie cherche à rétablir le bilan radiatif de la Terre qui a été modifié par l'effet de serre, et ce par la réduction de la quantité de rayonnement solaire absorbée par les surfaces du globe terrestre et qui entraîne son réchauffement. Chacune de ces deux approches a des avantages et des inconvénients. Mais, aucune des deux ne recherche à atténuer les émissions anthropiques de CO₂ à la source. Elles visent uniquement à baisser la concentration de ce gaz dans l'air ambiant ou d'influencer les radiations solaires qui représente la cause matérielle de l'effet de serre (Bourg et Hess, 2010; Lawrence et al., 2018; Zhang, Moore, Huisinigh et Zhao, 2015).

Ce chapitre comporte une revue des connaissances scientifiques sur les principales technologies de géo-ingénierie proposées pour lutter contre les CC à grande échelle. Pour chacune de ces méthodes, un bref état des informations disponibles en lien avec les critères suivants est donné :

- Le potentiel d'atténuation des CC évalué par : (1) le forçage radiatif qui pourrait être obtenu, et (2) la concentration du CO₂ qui pourrait être éliminé de l'atmosphère
- Les avantages de déploiement de la technologie
- Les facteurs qui influencent l'efficacité de ces approches
- Les effets secondaires potentiels
- Les coûts de déploiement

- L'état d'avancement (concept théorique seulement, phase de recherche, efficacité démontrée par simulation ou au laboratoire, application sur le terrain ou à l'échelle locale, commercialisation, technologie déjà existante, etc.)

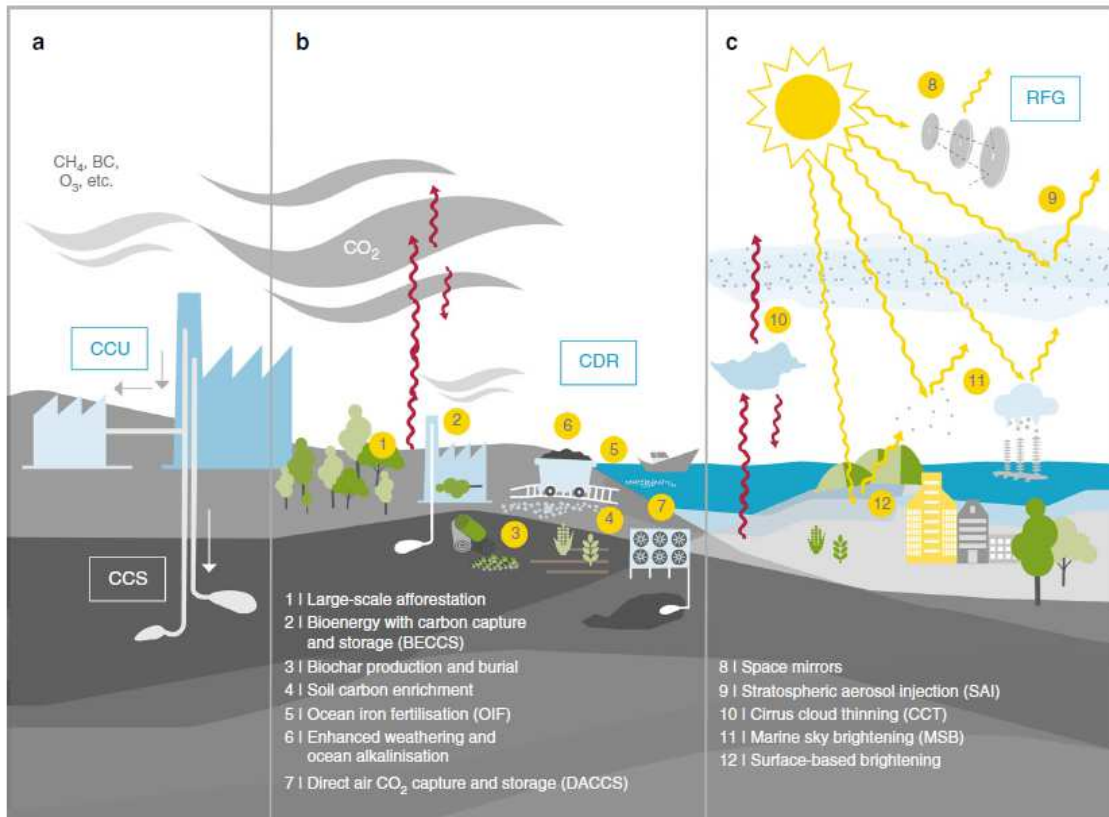


Figure 2.1 Technologies de géo-ingénierie de retrait de CO₂ de l'atmosphère (b) et de gestion du rayonnement solaire (c) (tiré de : Lawrence et al., 2018, p. 3)

2.1 Techniques de gestion de rayonnement solaire

Comme indiqué dans le chapitre 1, le CO₂ et les autres GES exercent un forçage radiatif (FR) positif sur la planète, car ils empêchent la dissipation par celle-ci des radiations thermiques vers l'espace. Ce fait cause la hausse de la température de la Terre confirmée actuellement par la plupart des études scientifiques. Les méthodes de gestion de rayonnement solaire visent à diminuer ce réchauffement en réduisant la lumière du soleil absorbée par la surface de la planète. En ce sens, la Terre absorbe en moyenne environ 240 W de radiation solaire par m⁻². Un doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, par rapport à son niveau préindustriel, provoquerait un FR proche de 4 W m⁻² (environ 3,7 W m⁻²). De ce fait, pour compenser ce forçage radiatif, l'énergie solaire reçue par la surface terrestre devrait être baissée d'environ 4/240, soit 1,7 %. (Bony et Dufresne, 2007; Caldeira et al., 2013; Lawrence et al., 2018; Vaughan et Lenton, 2011)

Si l'albédo des surfaces terrestres (pouvoir réfléchissant global) est pris en compte, une diminution de 1,8 % de la radiation solaire reçue serait équivalente à une augmentation de l'albédo planétaire compris entre 30 et 31,5 % (MacCracken, 2009). Dans ce sens, une hausse de l'albédo d'environ 0,31 à 0,32 devrait être atteinte pour avoir un déclin de 1,8 % du rayonnement solaire entrant (The Royal Society, 2009).

Toutes les approches de gestion de rayonnement solaire visent à corriger l'augmentation du FR, et ce par la diminution des rayons solaires qui se rendent à la surface du globe. Ainsi, la lumière du soleil pourrait être déviée de la Terre soit dans l'espace, dans la stratosphère, dans la basse atmosphère ou à la surface terrestre (Caldeira et al., 2013). Plusieurs technologies ont été proposées pour parvenir à ce but, et qui sont représentées dans la figure 2.2.

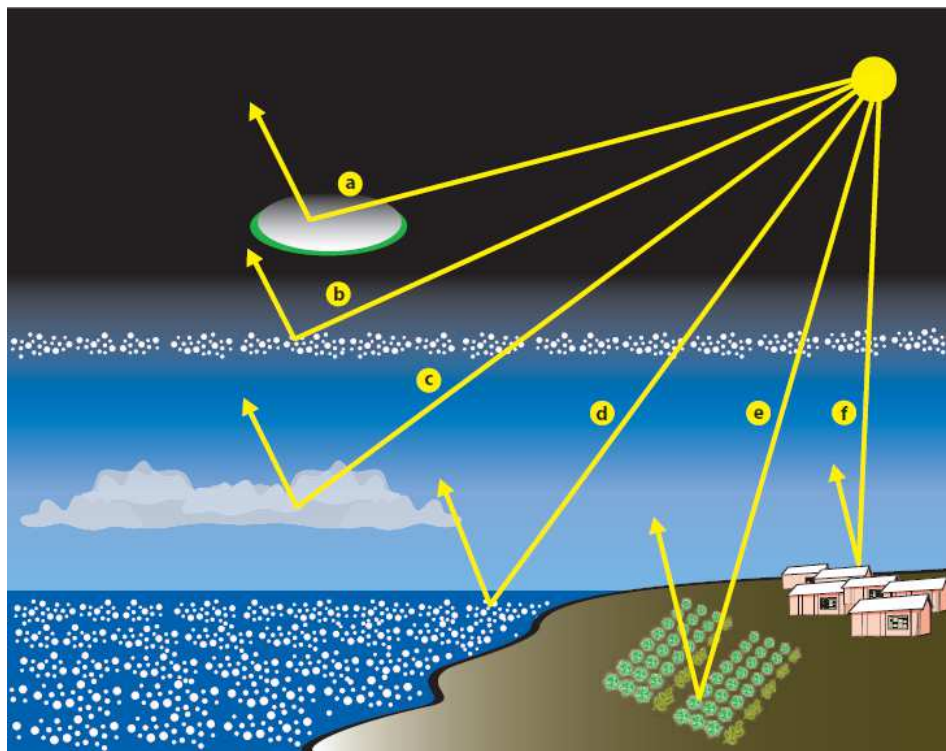


Figure 2.2 Illustration des technologies de gestion de rayonnement solaire (tiré de : Caldeira et al., 2013, p. 235)

Ces technologies de gestion de rayonnement solaire concernent les approches suivantes (figure 2.2) :

- a) L'utilisation de miroirs réfléchissants dans l'espace
- b) L'injection d'aérosols dans la stratosphère
- c) L'éclaircissement des nuages marins
- d) L'augmentation de l'albédo des océans
- e) L'augmentation de l'albédo des terres cultivées et prairies
- f) L'augmentation de l'albédo des zones urbaines

2.1.1 Emploi des aérosols stratosphériques

La technologie d'aérosols stratosphériques consiste à augmenter le nombre de particules d'aérosols dans la stratosphère pour amplifier la réflectivité de la lumière du soleil à environ 20 km d'altitude. Ces aérosols sont supposés d'induire, après un certain temps (quelques années), un FR négatif et donc une diminution de la température moyenne de la planète (Plazzotta, Séférian, Douville, Kravitz et Tjiputra, 2018; Smith et al., 2017; Vaughan et Lenton, 2011). Pour parvenir à ce but, les aérosols sont injectés directement dans la stratosphère ou sont synthétisés sur place après un ajout de certains gaz précurseurs qui se transforment en aérosols réfléchissants. Dans ce cas, les gaz précurseurs les plus étudiés sont le dioxyde de soufre (SO_2) ou le sulfure d'hydrogène (H_2S) qui s'oxydent dans la stratosphère et produisent des aérosols d'acide sulfurique (Robock, 2014; Visioni, Pitari et Aquila, 2017). Ces aérosols ainsi formés, d'un diamètre inférieur à 1 μm , renvoient une fraction de rayonnement solaire vers l'espace et provoquent un refroidissement de la Terre.

L'idée d'utiliser les aérosols pour atténuer les impacts du CC, a été proposée par Crutzen qui détient le prix Nobel en chimie. Ce dernier a suggéré de disperser au moins un million de tonnes d'aérosols de H_2S dans la stratosphère à l'aide de gros ballons pour imiter les effets observés pendant une grande éruption volcanique. Par exemple, en 1991, l'éruption du Mont Pinatubo a causé un refroidissement de la Terre de 0,5 °C après une année, et c'est seulement en 1995 que la température locale est revenue à son niveau avant l'éruption. Lors de cet incident, une quantité importante de H_2S , équivalente à 10 Tg de soufre (S), a été libérée dans l'atmosphère. Après six mois, un FR de $-4,5 \text{ W m}^{-2}$ a été détecté en présence de 6 Tg S dans la stratosphère. Pour reproduire un effet similaire et compenser le réchauffement planétaire, Crutzen estime un envoi continu d'une concentration plus faible de H_2S (correspond à 1 à 2 Tg S par an) dans la stratosphère. Cette opération pourrait coûter 25 à 50 milliards de dollars. (Crutzen, 2006)

Grâce à la simulation par les modèles climatiques, plusieurs études ont évalué le potentiel d'atténuation du réchauffement du climat par les aérosols sulfatés. La majorité de ces études s'accordent sur le fait que ces aérosols pourraient réduire la température terrestre de façon semblable à celle observée lors de grandes éruptions volcaniques. Mais, leurs effets sur la diminution de la température et le climat ne seraient pas similaires partout dans le monde, car ils pourraient différer selon les régions. En effet, plusieurs facteurs, comme la distribution spatiale des aérosols, pourraient influencer la linéarité de la relation entre les concentrations de S injectées dans la stratosphère et la réponse du climat terrestre. Pour cette raison, certains scientifiques proposent d'appliquer les aérosols dans la stratosphère selon une combinaison de plusieurs latitudes pour permettre un effet homogène sur l'atténuation du réchauffement global (MacMartin et al., 2017).

Le potentiel d'atténuation du réchauffement climatique par cette technologie a été évalué comme éventuellement efficace par la *United States Government Accountability Office* (USGAO, 2011). Plusieurs chercheurs ont estimé que cette approche pourrait compenser partiellement le réchauffement de la

Terre (tableau 2.1). Par exemple, elle pourrait induire un FR égal à $-1,4 \text{ W m}^{-2}$ lorsque $5 \text{ Tg de SO}_2 \text{ an}^{-1}$ ont été déployés. Les auteurs de cette même étude ont estimé que cette concentration de SO_2 pourrait compenser entre 23 % et 64 % des émissions de GES projetées pour l'année 2100 par rapport à 2011 (Visioni et al., 2017). D'autres valeurs de FR citées dans la littérature varient selon la concentration de soufre utilisée et la hauteur de son application dans la stratosphère. En général, ils sont de l'ordre de $-0,5$ à $-1,54 \text{ W m}^{-2}$ en présence de $5 \text{ Tg de SO}_2 \text{ an}^{-1}$ (Crook, Jackson, Osprey et Forster, 2015; Visioni et al., 2017).

Plusieurs facteurs semblent affecter l'efficacité de cette technologie. Les principaux facteurs rapportés sont la durée de vie, la taille et la concentration des aérosols, la hauteur de l'injection dans la stratosphère, ainsi que la nature des gaz précurseurs employés pour générer les aérosols dans la stratosphère. En ce sens, les aérosols ont une durée de vie limitée (1 à 2 ans environ) dans la stratosphère. Une perte d'une certaine quantité d'aérosols par déposition à la surface de la Terre pourrait se produire. Pour cette raison, ils doivent être réapprovisionnés au fur et à mesure de leur retrait de l'atmosphère pour maintenir leur effet de refroidissement du climat. (Rasch, Crutzen et Coleman, 2008; Vaughan et Lenton, 2011; Visioni, Pitari, Tuccella et Curci, 2018)

La grosseur des particules d'aérosols dans les nuages joue un rôle important dans le rendement de cette technologie, car elle influence l'intensité des radiations solaires réfléchies. En effet, les aérosols de petite taille ($0,1 \mu\text{m}$) réfléchissent plus de lumière que ceux de grande taille. Ainsi, si les aérosols sont de petite taille, une quantité égale à $1,5 \text{ Tg de S par an}$ serait suffisante pour avoir un effet significatif sur le réchauffement climatique. Par contre, le double de cette quantité serait nécessaire si ces particules sont de grande taille (Rasch et al., 2008). De même, la durée de vie des aérosols semble être influencée par leur grosseur, car les grandes particules vont se sédimenter plus rapidement comparée à celles de petite taille (Irvine, Kravitz, Lawrence et Muri, 2016; Lawrence et al., 2018).

Quant à la concentration de S requise pour compenser l'augmentation du CO_2 atmosphérique, elle varie légèrement d'une étude à l'autre selon les méthodes de simulations utilisées pour tester l'efficacité des aérosols. Par exemple, pour stabiliser la température terrestre à 2°C en 2100 ans, une quantité de S d'environ $4,5 \text{ Tg par an}$ devrait être injectée sous forme de H_2S dans la stratosphère (Izrael, Volodin, Kostykin, Revokatova, et Ryaboshpko, 2013).

Un autre facteur important concerne la relation entre la quantité de SO_2 dispersée dans la stratosphère et le FR qui ne semble pas être linéaire. En effet, l'efficacité des aérosols pour atténuer le FR diminue lorsque la concentration de SO_2 dans la stratosphère est élevée (Kleinschmitt, Boucher et Platt, 2018; Niemeier et Timmreck, 2017). Ce fait laisse supposer un effet de saturation de la stratosphère quand la concentration de SO_2 atteint un certain niveau, et qui devrait être étudiée plus en détail pour maintenir un rendement optimal de cette technologie.

L'emploi des aérosols stratosphériques présente plusieurs avantages comme indiqué dans le tableau 2.1. Par exemple, ils permettraient une diminution rapide de la température globale de la planète (au moins une année), ce qui contribuerait à limiter les impacts des CC (Robock, 2016). Ils pourraient également réduire l'intensité des rayons UV qui arrivent à la surface terrestre ce qui est bénéfique pour la santé humaine, mais à condition qu'aucune altération ne se produise dans la couche d'ozone (Barrett, 2008).

Les études scientifiques ont mentionné de nombreux risques potentiels liés à l'emploi des aérosols stratosphériques (tableau 2.1) (Robock, 2014). En effet, après leur application dans la stratosphère, une certaine quantité d'aérosols sulfatés pourrait se déposer dans la troposphère et induire certains changements. Ces derniers concernent la formation de précipitations acides qui causeraient des dommages aux écosystèmes selon la concentration de sulfates qu'ils contiennent. De même, puisque les aérosols sulfatés réduisent l'intensité de la lumière solaire incidente, une diminution du rendement des centrales solaires à générer l'énergie pourrait se produire (Irvine et al., 2016; Robock, 2014).

Tableau 2.1 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par les aérosols stratosphériques (inspiré de : Crook et al., 2015; Irvine et Ridgwell, 2009; Irving et al., 2016; Kleinschmitt, et al., 2018; Lawrence et al., 2018; MacMartin et al., 2017; Robock, 2016; Schäfer et al., 2015; USGAO, 2011; Vioni et al., 2017)

Emploi d'aérosols stratosphériques	
Potentiel d'atténuation de la température globale	<ul style="list-style-type: none"> • Potentiellement efficace • FR : -0,5 à -1,54 W m⁻²
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer la température globale rapidement • Réduire l'intensité des impacts des CC • Similitude avec le sulfate des éruptions volcaniques offre des données empiriques pour estimer les risques et l'efficacité
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation à une concentration élevée des aérosols • Taille des aérosols • Durée de vie des aérosols • Latitude d'application des aérosols
Risques potentiels	<ul style="list-style-type: none"> • Contribue à la perte de la couche d'ozone • Favorise les précipitations acides • Induit une variation régionale des précipitations • Augmentation des radiations diffuses qui affecteraient les écosystèmes • Réchauffement climatique rapide si arrêté rapidement
Coût	<ul style="list-style-type: none"> • Variable selon la technique de livraison • 35 à 65 milliards \$ US la première année, plus 13 à 25 milliards \$ US pour les coûts opérationnels chaque année
État d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche et développement • Efficacité démontrée par modélisation et observation des effets des volcans

Les aérosols sulfatés pourraient également induire des modifications chimiques de la stratosphère comme l'activation du cycle de destruction de l'ozone par les composés chlorés. Ce fait pourrait donc amplifier le potentiel de destruction de l'ozone par le chlorofluorocarbure et en particulier dans les régions polaires (Tilmes, Garcia, Kinnison, Gettelman et Rasch, 2009). Le cycle de destruction de l'ozone catalysé par le radical hydroxyle pourrait de même être accéléré par les aérosols sulfatés à cause de l'augmentation de la température de la stratosphère par l'injection de ces derniers. Ce processus contribuerait à l'appauvrissement de la couche d'ozone et retarderait la réparation de celle-ci (Heckendorn et al., 2009; Lawrence et al., 2018; Richter et al., 2017). Néanmoins, pour contrer les influences de ces substances sur l'ozone, plusieurs autres aérosols ont été proposés. Un exemple de ces derniers concerne les particules solides d'alumine qui ont moins d'effet sur l'ozone, et qui absorbent moins d'énergie solaire afin d'éviter un réchauffement supplémentaire de la stratosphère (Weisenstein, Keith et Dykema, 2015). Les aérosols pourraient aussi affecter la croissance de la végétation en réduisant les radiations disponibles pour la photosynthèse. Cependant, cet effet serait compensé par la fraction des radiations diffuses qui augmenterait en présence des aérosols, et qui permettrait un taux de photosynthèse relativement élevé (Ito, 2018; Vaughan et Lenton, 2011).

En ce qui concerne les conséquences des aérosols sur le climat, les études de simulation par modélisation ont montré une baisse de la quantité des précipitations lorsque le sulfate est utilisé comme aérosol (Ferraro et Griffiths, 2016). Les régions d'Afrique et d'Asie seraient les plus affectées par ce phénomène ce qui pourrait déclencher des épisodes de sécheresse importante dans ces endroits (Robock, 2016).

En résumé, du point de vue technique, la technologie des aérosols stratosphériques serait faisable, et la diminution de la température globale pourrait être obtenue après quelques années d'emploi de ses substances. Cependant, elle aurait beaucoup d'impacts négatifs potentiels sur l'environnement et le climat. Son application à grande échelle à court (5 ans) et moyen terme (10 ans) est très peu probable, car beaucoup de recherches sont encore nécessaires pour déterminer les répercussions réelles des aérosols sur la santé humaine, la biodiversité et l'environnement.

2.1.2 Éclaircissement des nuages marins

Cette technologie vise à augmenter l'énergie solaire réfléchi par les nuages situés au-dessus des océans. Ces derniers sont ciblés par cette technologie, car ils ont un albédo très faible et occupent une grande superficie de la Terre de l'ordre de 71 % (Jin, Charlock, Smith et Rutledge, 2004; Zhang et al., 2015). Pour cela, tout accroissement significatif de l'albédo des océans pourrait avoir un effet notable sur le FR global de la planète. En effet, les océans ont un albédo très faible d'environ 0,03 à 0,08 (Grannec et Litt, s. d.; Irving et Ridgwell, 2009). Par contre, les nuages de basses altitudes, comme les *cumulus*, ont un albédo élevé égal à 0,75 (tableau 2.2). Pour cette raison, les nuages pourraient avoir une influence importante sur la température de la Terre. En ce sens, lorsque le ciel situé au-dessus des océans est clair, une quantité notable de rayons solaires se rendraient à la surface des océans ce qui causerait le réchauffement de la

planète. L'effet inverse pourrait se produire quand le ciel en haut des océans est couvert de nuages, car ces derniers vont réfléchir une bonne partie de radiations solaires entrantes ce qui induirait un refroidissement de la surface des océans et donc de la Terre. (Grannec et Litt, s. d.)

Tableau 2.2 Estimation de l'albédo de différentes surfaces terrestres et des nuages (tiré de : Grannec et Litt, s. d., p. 7)

		Albédo (0-1)
	<i>Albédo terrestre moyen</i>	0,3
Surface terrestre	Forêt	0,05 - 0,1
	Océans	0,08
	Neige ancienne	0,5 - 0,6
Nuages	Cirrus	0,2 – 0,4
	Stratus	0,4 – 0,65
	Cumulus	0,75
	Cumulonimbus	0,9

En général, le pouvoir réfléchissant des nuages augmente à mesure que le nombre de gouttelettes d'eau qu'ils contiennent est élevé. Le principe de cette technologie comprend une amplification de la réflectivité des nuages situés à basse altitude (*stratocumulus*), et ce par l'augmentation du nombre des noyaux de condensation dans ces nuages (CCN). Cela favorise la formation dans ces derniers d'un grand nombre de petites gouttes d'eau qui renvoient la lumière du soleil vers l'espace. (Schäfer et al., 2015; Vaughan et Lenton, 2011) La figure 2.3 montre ainsi un nuage intact qui contient quelques gouttelettes d'eau de grande taille. Ce nuage a une faible réflectivité du rayonnement solaire. Par contre, le nuage situé à droite, dans lequel des noyaux de condensation nucléiques ont été injectés, possède de nombreuses gouttelettes d'eau qui ont un petit diamètre. Ces dernières occupent plus de surface dans le nuage, et limitent donc le passage des radiations solaires vers la Terre.

Pour augmenter le nombre de CCN dans les nuages, des approches mécaniques ou biologiques peuvent être utilisées. La méthode mécanique la plus étudiée à cette fin est une fine pulvérisation de l'eau de mer dans l'atmosphère, et ce par l'emploi d'aéronef ou des navires spécialement conçus à cet effet qui pourraient être alimentés par l'énergie éolienne. Ainsi, des embruns d'eau des océans sont générés et soulevés par turbulence pour asperger une quantité suffisante de CCN dans l'atmosphère (Salter, Sortino et Latham, 2008). Des valeurs de FR variant entre -1,7 et -5,1 W m⁻² pourraient être obtenues par la méthode mécanique. Elles seraient supérieures à celles reportées pour l'approche des aérosols

stratosphériques (tableau 2.3) (Crook et al., 2015; Schäfer et al., 2015). Les auteurs de l'étude de USGAO (2011) ont estimé que cette approche serait également potentiellement efficace pour diminuer la température globale à condition que les nuages soient éclaircis en continu pour maintenir l'effet de refroidissement du climat. Similairement, dans le cadre du projet de *Geoengineering Model Intercomparison*, une simulation par 9 modèles climatiques a été effectuée pour analyser la compensation, par cette technologie, d'un FR de $4,5 \text{ W m}^{-2}$. Tous ces modèles prédisent une baisse de la température terrestre pour les années 2020 à 2069. Par contre, la moyenne des précipitations globales a légèrement décliné de -2,35 % à cause du refroidissement du climat, et a augmenté de 1,19 % dans les régions situées à basse altitude (Stjern, 2018).

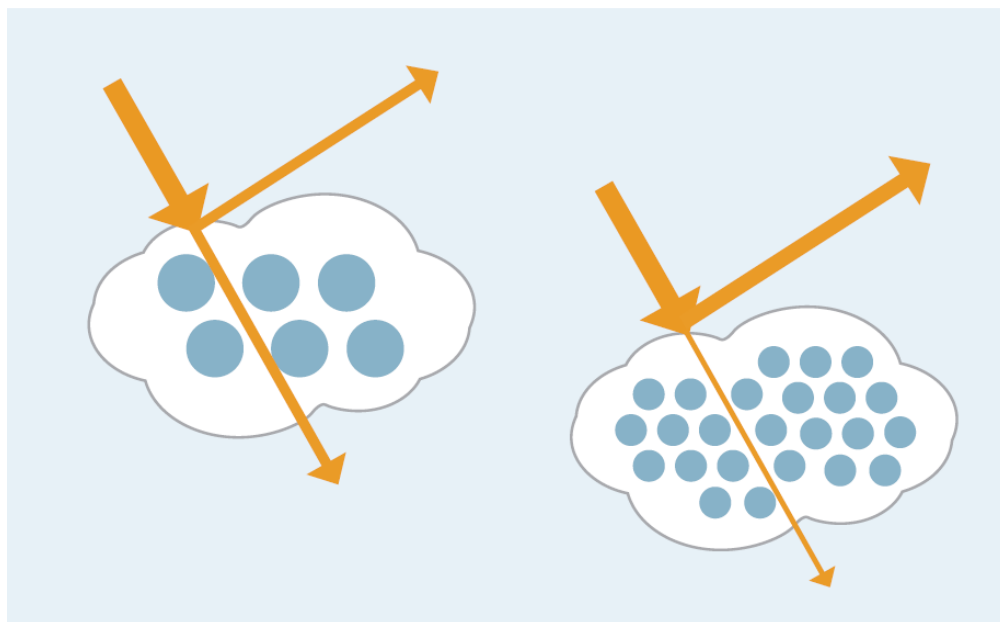


Figure 2.3 Représentation d'éclaircissement des nuages après injection des aérosols dans l'atmosphère (tiré de : Schäfer et al., 2015)

La méthode biologique quant à elle consiste à fertiliser des parcelles de l'océan avec du fer, sous forme d'une solution de sulfate de fer, pour stimuler la croissance des phytoplanctons marins (Wingenter et al., 2007). Ces derniers libèrent une quantité importante de Diméthylsulfonopropionate et diméthylsulfoxyde qui représentent des composés précurseurs pour le diméthylsulfure. Celui-ci une fois relâché dans l'atmosphère s'oxyde et forme des aérosols sulfatés qui constituent une source de CCN dans les zones marines éloignées (Grandey et Wang, 2015). Le potentiel d'atténuation du FR par cette technologie serait très faible comparé à celui de la méthode mécanique susmentionnée, puisqu'il est compris entre $-0,019$ et $-0,025 \text{ W m}^{-2}$ (tableau 2.3) (Vaughan et Lenton, 2011). Elle ne serait donc pas efficace pour diminuer suffisamment la température globale de la Terre.

Les coûts nécessaires pour éclaircir les nuages marins sont variables dans la littérature. À titre d'exemple, les coûts pour la méthode mécanique pourraient comprendre : 2,3 à 4,7 milliards \$ US pour l'acquisition de la flotte de 1 500 navires, 42 millions \$ US pour le développement technologique, et 47 millions \$ US pour la production d'outillage (tableau 2.3) (Salter et al., 2008; USGAO, 2011).

L'éclaircissement des nuages marins comporte plusieurs risques potentiels pour le climat et l'environnement (tableau 2.3). En raison de l'inhomogénéité spatiale de l'albédo des nuages, les conséquences de cette technologie sur la planète devraient montrer des variations régionales. Par exemple, une simulation par modélisation a été réalisée pour évaluer l'effet de la pulvérisation des nuages (situés au-dessus de l'océan pacifique) par l'eau de mer sur le climat mondial. Les résultats ont indiqué que la température terrestre a diminué jusqu'à son niveau préindustriel. Mais, les impacts de cette expérience ont été différents selon les régions : un refroidissement notable dans l'équateur pacifique, une poursuite du réchauffement de l'Arctique, un changement des précipitations dans l'ouest du Pacifique, et la persistance des ouragans. En plus de ces effets, une modification de la circulation du vent est remarquée dans les régions de l'Atlantique tropical, la mer de Chine et l'est du Japon (Baughman, Gnanadesikan, Degaetano, et Adcroft, 2012).

Tableau 2.3 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'éclaircissement des nuages marins (inspiré de : Crook et al., 2015; *Geoengineering Monitor*, 2018; Lawrence et al., 2018; Muri, Niemeier et Kristjansson, 2015; Schäfer et al., 2015; USGAO, 2011; Vaughan et Lenton, 2011)

Éclaircissement des nuages marins	
Potentiel d'atténuation de la température globale	<ul style="list-style-type: none"> • Potentiellement efficace • FR : -1,7 à -5,1 W m⁻²
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer la température globale • Effet réversible si arrêté rapidement
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un renouvellement de la pulvérisation des nuages • Pollution stratosphérique diminuerait son efficacité
Risque potentiel	<ul style="list-style-type: none"> • Induit des variations régionales dans les précipitations • Diminue l'évaporation des eaux • Affecte la productivité des cultures • Diminue le rendement des centrales solaires • Affecte les écosystèmes à cause des aérosols marins • Corrosion des infrastructures à cause des aérosols marins émis dans l'air
Coût	<ul style="list-style-type: none"> • 2,3 à 4,7 milliards \$ US pour l'acquisition de la flotte de 1500 navires, 42 millions \$ US pour le développement technologique, et 47 millions \$ US pour les équipements
État d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> • Phase de recherche • Développement des prototypes • Certaines expériences sur le terrain sont prévues à petite échelle dès l'été 2018

Une autre étude a autant montré que cette technologie, appliquée à grande échelle, induirait des impacts régionaux différents, et que les précipitations ont fortement décliné dans le bassin amazonien (Jones, Haywood et Boucher, 2009). Cette diminution dans la quantité des précipitations pourrait être expliquée par la formation d'un grand nombre de petites gouttes d'eau dans les nuages après pulvérisation par l'eau de mer. Ces gouttelettes de petite taille ont ainsi une durée de vie plus longue ce qui retarde les précipitations (Bower, Choullarton, Latham, Sahraei et Salter, 2006). Par contre, d'autres chercheurs ont indiqué que cette technologie pourrait accroître les précipitations dans certaines régions situées à basse latitude ce qui augmenterait le risque d'inondation dans ces zones (Alterskjær et al., 2013). De plus, la hausse de la réflectivité des nuages réduirait la disponibilité de la lumière à la surface terrestre, ce qui affecterait la productivité des écosystèmes, l'agriculture, et les rendements des panneaux solaires.

Plusieurs tentatives étaient prévues pour appliquer cette technologie en conditions réelles, mais elles ont été annulées à cause d'une contestation publique ou retardées par manque de financement. Mais, dans le cadre du projet de *The Marine Cloud Brightening Project*, une première expérience sur le terrain était présagée en été 2018 en Californie pour tester l'efficacité des prototypes conçus pour pulvériser l'eau de mer sur les nuages. L'étape suivante de ce projet serait de mener des essais à une échelle plus vaste en océan dans une date ultérieure. (*Geoengineering Monitor*, 2018)

2.1.3 Augmentation de l'albédo des terres cultivées et des prairies

Cette approche vise à accroître la réflectivité de surfaces terrestres, et ce par la culture sur celles-ci des plantes qui ont une capacité élevée de réfléchir la lumière du soleil. Cela contribuerait à augmenter l'albédo terrestre et donc au refroidissement de la Terre. En ce sens, des espèces végétales naturelles ou génétiquement modifiées pourraient être utilisées (Carrer, Pique, Ferlicoq, Ceamanos et Ceschia, 2018; Davies-Barnard, 2014; Ridgwell, Singarayer, Hetherington et Valdes, 2009).

L'efficacité de cette méthode dépend de l'intensité de l'amplification de l'albédo par ces plantes et la surface des terres employées pour la croissance de celles-ci. En ce sens, la réflectance des radiations solaires par les plantes varie selon les espèces. Par exemple, les feuilles des plantes herbacées comme l'orge ont un albédo plus élevé (0,19 à 0,27) que celui des arbres de conifères (0,11 à 0,16) (Davies-Barnard, 2014; Irvine, Ridgwell et Lunt, 2011). Elle varie également selon les variétés de la même espèce qui ont souvent des feuilles avec différentes propriétés structurales et morphologiques.

Une grande variété naturelle d'arbustes et de graminées (de couleur claire) possèdent un albédo élevé dans le spectre des radiations visibles. Des exemples de ces plantes concernent : les graminées comme *Carex hachijoensis* et *Chlorophytum comosum* et les arbustes comme *Alpinia zerumbet*, *Euonymus europaeus* et *Ficus aspera*. Environ 60 % de la surface foliaire de ces espèces est couverte de taches ou de rayures d'une couleur jaune clair ou blanc à cause d'une faible concentration de la chlorophylle et d'autres pigments. D'autres types de végétaux qui ont également un albédo élevé comprennent des

arbustes de couleur blanche comme *Cerastium biebersteinii* et *Senecio cineraria*. La surface foliaire de ces deux espèces est tapissée de trichomes denses qui ont pour effet d'augmenter l'albédo de la feuille, et de diminuer la lumière qui parvient aux molécules de la chlorophylle. (Hamwey, 2007)

L'utilisation de cette approche sur des terres cultivées et prairies pourrait induire un FR égal à $-0,6 \text{ W m}^{-2}$ et $-0,3 \text{ W m}^{-2}$, respectivement, d'ici 2100 (Schäfer et al., 2015) (tableau 2.4). Similairement, un FR moyen égale à $-0,15 \text{ W m}^{-2}$ a été estimé dans l'éventualité où la technologie d'augmentation de l'albédo serait déployée en terres cultivées en Europe (Carrer et al., 2018). Au niveau local, l'effet sur l'albédo des surfaces du sol de cette technologie pourrait être $+0,02$ à $+0,15$ selon Seneviratne et al., (2018). Ces données indiquent que le potentiel de cette approche pour atténuer le réchauffement planétaire serait faible relativement au FR de -4 W m^{-2} requis pour compenser la hausse des émissions de GES à la fin de ce siècle. Cependant, elle pourrait avoir un impact bénéfique sur le climat local de la zone où elle est appliquée.

Tableau 2.4 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'augmentation de l'albédo des terres cultivées et des prairies (inspiré de : Carrer et al., 2018; Davies-Barnard, 2014; Hirsch et al., 2017; Schäfer et al., 2015; Seneviratne et al., 2018; USGAO, 2011; Wilhelm, Davin, et Seneviratne, 2015)

Augmentation de l'albédo des terres cultivées et des prairies	
Potentiel d'atténuation de la température globale	<ul style="list-style-type: none"> Faible effet sur la température globale Effet régional et saisonnier FR : $-0,15$ à $-0,6 \text{ W m}^{-2}$
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> Diminuer la température extrême (locale ou régionale) Contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air Facile à implanter
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> Superficie de la terre utilisée Période de croissance Entretien des cultures chaque année
Risque potentiel	<ul style="list-style-type: none"> Conflit potentiel avec l'utilisation des terres Affecter le cycle de carbone à long terme Seules certaines régions pourraient bénéficier d'une diminution de la température
Coût	<ul style="list-style-type: none"> Non déterminé
État d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> Technologie déjà présente Certaines variétés de plantes ont été cultivées sur le terrain dans certaines régions à petite échelle

Comparée aux autres technologies de gestion de radiation solaire, l'approche de l'augmentation de l'albédo des terres cultivées et prairies comporte très peu de risque lorsqu'elle est déployée sur le terrain (tableau 2.4). Néanmoins, son emploi, à long terme et sur une grande surface, pourrait affecter le cycle de carbone et les écosystèmes. En effet, comme cité précédemment, les plantes qui ont un albédo élevé contiennent en général une faible teneur en chlorophylle, et donc une faible activité photosynthétique. Cela signifie que ces végétaux utilisés auraient une faible capacité de fixation de CO_2 (Hamwey, 2007; Zamft et Conrado, 2015). De plus, cette technologie serait limitée par la saison de croissance des plantes et les régions qui ont des conditions climatiques favorables à la croissance des plantes. Par ailleurs, la simulation

effectuée par une étude récente a montré que le déploiement de cette approche, combinée avec l'irrigation, pourrait diminuer les températures extrêmes en Amérique du Nord, en Eurasie et en Inde (Hirsch, Wilhelm, Davin, Thiery et Seneviratne, 2017).

En résumé, l'emploi de cette technologie à grande échelle serait limité dans le temps et dans l'espace, car elle dépend de la période de croissance des plantes. De plus, elle risque de causer des conflits potentiels avec les activités agricoles (Seneviratne et al., 2018). Pour cette raison, son déploiement ne serait pas suffisant pour compenser le réchauffement de l'ensemble de la planète. Mais, elle pourrait constituer un avantage dans les régions fortement peuplées, puisqu'elle pourrait adoucir la température locale durant l'été qui serait bénéfique pour la santé humaine. Elle contribuerait de cette façon à l'atténuation partielle des effets du CC.

2.1.4 Augmentation de l'albédo des milieux urbains.

L'idée d'augmenter l'albédo des zones urbaines a été proposée depuis plusieurs années pour réduire les effets négatifs des îlots de chaleur et améliorer la qualité de l'air dans les villes. Le principe de cette approche consiste à accroître l'albédo des villes par le remplacement des matériaux de construction standards (toit, pavage, etc.) avec d'autres matières ou par ajout de revêtements qui ont une capacité élevée pour réfléchir la lumière du soleil. Pour atteindre ce but, des toits hautement réfléchissants et une modification de certains constituants employés dans le pavage des routes sont proposés (Akbari, Menon et Rosenfeld, 2009; Castaldo et al., 2018; Kyriakodis et Santamouris, 2018; Rosso et al., 2018). De même, des pigments réfléchissants sont explorés pour leur usage dans la fabrication de revêtements des toits des bâtiments en milieu urbain (Meenakshi, Selvaraj, 2018). Aucune information sur les impacts négatifs liés au déploiement de cette approche n'a été citée dans la littérature (tableau 2.5).

Les études menées pour évaluer l'efficacité de cette technologie pour diminuer le FR montrent des résultats variables selon les infrastructures utilisées. Toutefois, les valeurs du FR sont très faibles, car elles sont comprises entre -0,044 et -0,17 W m⁻² (tableau 2,5; Akbari et al., 2009; Hamway, 2007; Vaughan et Lenton, 2011). Les matériaux employés comme les toits et les pavements réfléchissants semblent avoir un effet sur la température locale, alors que leur influence sur le réchauffement planétaire serait très minime. En effet, les pavements et les toits réfléchissants pourraient diminuer la température de la surface du sol par 9,7 °C et 11,3 °C en mi-journée, respectivement en milieu urbain (Wang, Berardi et Akbari, 2016). Dans ce sens, une étude récente a indiqué que ces matériaux pourraient compenser partiellement ou totalement les îlots de chaleurs en villes. Par ailleurs, cette étude a démontré que les pavages réfléchissants semblent présenter un potentiel de refroidissement de l'air ambiant plus élevé que celui des toits réfléchissants. Ceci est expliqué par le fait que les pavages situés au niveau du sol ont une plus grande influence sur la température ambiante par des processus de convection. Par contre, les toits réfléchissants installés à un niveau plus haut par rapport au sol affecteraient plutôt la température de l'air au-dessus du toit. Ainsi, les effets d'atténuation de la température ambiante du toit réfléchissant dépendraient de la capacité de l'air

froid à atteindre le sol. De ce fait, plus le bâtiment est haut, plus son potentiel de refroidissement sur la température ambiante au niveau du sol est moins important, voire même négligeable. (Santamouris et al., 2017)

Tableau 2.5 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'augmentation de l'albédo des milieux urbains (inspiré de : Akbari et al., 2009; Hamway, 2007; Irvine et Ridgwell, 2009; Mastrapostoli et al., 2016; Santamouris et al., 2017; Seneviratne et al., 2018; The Royal Society, 2009; Vaughan et Lenton, 2011; Wang et al., 2016)

Augmentation de l'albédo des milieux urbains	
Potentiel d'atténuation de la température globale	<ul style="list-style-type: none"> Faible effet au niveau global FR : -0,044 à -0,17 W m⁻²
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> Contribue à diminuer les effets des îlots de chaleur en villes Économie d'énergie liée à la climatisation en été Favorise la diminution de l'emploi d'énergie fossile Les toits réfléchissants sont faciles à installer et moins chers qu'un toit vert
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> Superficie de la terre utilisée Remplacement des matériaux réfléchissants et leurs entretiens Dépôt des polluants atmosphériques à la surface des matériaux réfléchissants
Risques	<ul style="list-style-type: none"> Peu connus Changement esthétique des villes
Coût	<ul style="list-style-type: none"> Variable selon les fournisseurs et les pays
État d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> Technologie déjà existante Certaines villes ont déjà quelques infrastructures réfléchissantes. Mais elle n'est pas appliquée à grande échelle

Récemment, une entreprise québécoise, désignée par Les Produits Verglass, a commencé à fabriquer et commercialiser des granules à base de verre (les poudres de verre Miraglass) qui servent à la construction des toits blancs pour des édifices en villes. Ces derniers offrent la possibilité de contribuer à une certification de *Leadership in Energy and Environmental Design*. Ils pourraient également avoir un potentiel plus élevé pour réfléchir les rayons solaires comparés aux toits ordinaires. Toutefois, une évaluation de leur FR respectif serait souhaitable afin de valider leur efficacité d'atténuation des températures ambiantes en zone urbaine très peuplée.

En résumé, l'estimation du potentiel d'applicabilité des technologies d'augmentation de l'albédo des milieux urbains nécessite une évaluation de la quantité de surfaces urbaines blanchissantes par habitant. Pour cela, *The Royal Society* (2009) a établi que son efficacité pour contrer le réchauffement global serait très limitée, car les surfaces urbaines disponibles dans le monde ne sont pas suffisantes pour optimiser la rentabilité de cette technologie. De plus, l'effet des surfaces hautement réfléchissantes devrait se dissiper avec leur vieillissement en raison de la déposition des polluants atmosphériques urbains à leurs surfaces

(Mastrapostoli et al., 2016). Pour cette raison, ils devraient être entretenus et remplacés selon leur durée de vie pour maintenir leur influence sur l'albédo en villes.

2.1.5 Augmentation de l'albédo des océans

Une proportion importante de la surface de la planète est couverte par les océans et les mers. Ces derniers possèdent un albédo très faible à cause de leurs couleurs sombres. Par conséquent, comme mentionnés précédemment, les océans absorbent la majorité (93 %) de la radiation solaire qui atteint le globe terrestre (Grannec et Litt, s. d.; Irving et Ridgwell, 2009; Seitz, 2011). Ce fait justifie le recours à des technologies qui permettraient d'augmenter leur pouvoir réfléchissant.

Pour améliorer l'albédo des océans, une technologie qui vise à ajouter des microbulles réfléchitives dans une large surface des océans a été proposée. Cependant, la durée de vie de ces microbulles est limitée, car elle dépend de plusieurs facteurs comme l'influence de l'air ambiant et des agents tensioactifs utilisés. Seiz (2011) a démontré que ces microbulles, employés à faibles concentrations (quelques parties par millions) pourraient accroître la réflectivité des océans. Cet auteur a estimé que l'augmentation de l'albédo des océans par cette technologie aboutirait à une diminution de l'énergie solaire incidente d'environ 100 W m^{-2} . Le potentiel d'atténuation des CC par cette technologie serait moyen, car il pourrait compenser 10 % des émissions totales de CO_2 projetées pour ce siècle. Dans ce sens, un FR proche de -2 W m^{-2} pourrait être obtenu par cette technologie (Caldeira et al., 2013; tableau 2.6).

Les impacts sur l'environnement de cette technologie ne sont pas bien élaborés dans les études scientifiques. Mais, certains scientifiques ont souligné qu'elle pourrait avoir des effets sur la circulation océanique, le mélange vertical des eaux dans les océans, la photosynthèse, et la biosphère marine (Gabriel, Robock, Xia, Zambri et Kravitz., 2017; Robock, 2011). Pour éviter ces effets sur les écosystèmes marins, certains chercheurs ont proposé de déployer cette approche dans les 20 % des océans de la planète qui n'ont pas une activité biologique (Aziz, Hailes, Ward et Evans, 2014). De plus, pour augmenter la durabilité des microbulles, Aziz et al., 2014 ont développé des mousses qui ont une durée de vie plus longue (3 mois), qui sont non toxiques et ne nécessitent pas un brassage des eaux des océans. Ainsi, pour générer ces mousses, deux produits utilisés dans l'industrie alimentaire ont été suggérés par ces auteurs. Le premier est constitué de complexes de gélatine à teneur élevée en ester de méthyle qui a une réflectance de 0,5. Le deuxième produit est un polysaccharide qui contient des éthers de cellulose et des gélifiants *lota carraghénane*, qui permettrait une réflectance comprise entre 0,65 et 0,75.

Une étude récente a indiqué que l'emploi de cette technologie pourrait augmenter les précipitations dans certaines régions, en plus de réduire la température globale (Gabriel et al., 2017). De même, lorsqu'elle est appliquée à l'océan arctique, elle pourrait restaurer partiellement la surface des glaces, et diminuer le réchauffement dans ces régions de $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Par contre, elle affecterait la distribution des précipitations dans

certaines zones des États-Unis et le nord-est du pacifique (tableau 2.6; Cvijanovic, Caldeira et MacMartin, 2015).

Tableau 2.6 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'augmentation de l'albédo des océans
(inspiré de : Caldeira et al., 2013; Crook et al., 2015; Cvijanovic et al., 2015; Gabriel et al., 2017; Robock, 2011)

Augmentation de l'albédo des océans	
Potentiel d'atténuation de la température globale	<ul style="list-style-type: none"> • Moyen • FR : -2 W m^{-2}
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Refroidir l'océan pourrait augmenter l'absorption du CO_2
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Faisabilité technique • Durée de vie des bulles • Nature des agents tensioactifs utilisés
Risques potentiels	<ul style="list-style-type: none"> • Peu connus • Effet potentiel sur les écosystèmes marins et la circulation des océans • Changement dans les précipitations
Coût	<ul style="list-style-type: none"> • Non disponible
État de développement	<ul style="list-style-type: none"> • Phase de recherche • Des simulations par modélisation ont été réalisées • Quelques expériences en laboratoire ont été effectuées

2.1.6 Les miroirs réfléchissants dans l'espace

Bien que cette technologie semble être surréaliste, elle a été proposée comme approche potentielle d'atténuation des CC. Elle consiste à installer dans l'espace des miroirs géants pour réfléchir la lumière du soleil incidente. Ces miroirs devraient être fabriqués en matériaux optiques très légers (He et Zheng, 2017). L'emplacement idéal suggéré pour un miroir réfléchissant dans l'espace est l'une des positions où les champs de gravité de Soleil et de la Terre s'équilibrent. Cette position fournit une force centripète requise pour qu'un troisième corps accompagne simultanément le mouvement orbital des deux premiers corps (Terre et Soleil), et ce à la même vitesse. Cet emplacement est connu sous le nom de point de Lagrange L1 situé à 1,5 million de km de la Terre (figure 2.4). Il permettrait ainsi au miroir réfléchissant de rester dans une position où il pourrait projeter une ombre continue sur la Terre. Placés de cette manière dans l'espace, les miroirs pourraient réduire le flux d'énergie solaire incidente, et diminueraient la température planétaire. (Hickman, 2018; Kunzig, 2008; Sánchez et McInnes, 2015)

Dans la littérature, les estimations de coût de déploiement de cette approche sont variables selon les auteurs. En général, il varie entre 1,3 à 5 mille milliards \$ US pour installer des miroirs réfléchissants dans l'espace (tableau 2.7) (Kunzig, 2008; USGAO, 2011). Ces coûts élevés nécessitent d'utiliser des ressources importantes. Certains scientifiques pensent qu'une surface de panneaux d'environ 2 millions de km^2 serait requise pour atténuer l'excès d'énergie solaire de la Terre. Toutefois, puisque cet excès augmente d'une année à l'autre, un ajout de 36 000 km^2 de panneaux dans l'espace par an devrait être effectué. Cela signifie 155 000 lancements par an. Chacun de ces lancements comprend 800 000 panneaux. (Vaughan et

Lenton, 2011; Vives, 2013). Ces estimations indiquent encore une fois que cette technologie nécessiterait des moyens considérables, voire irréalistes.

Le risque potentiel associé à l'emploi des miroirs réfléchissants serait très élevé (Irvine et Ridgwell, 2009) (tableau 2.7). Certaines études ont stipulé qu'ils pourraient induire des changements dans les écosystèmes. Par exemple, une étude récente a montré que l'emploi de cette technologie pourrait avoir des effets sur le cycle global de carbone. Les résultats de cette étude indiquent qu'elle augmenterait l'absorption de CO_2 par la biosphère terrestre, ce qui se traduirait par la hausse de la production primaire nette dans les tropiques. En 2100, selon cette même étude, cette technologie pourrait diminuer de 12 % le niveau du CO_2 dans l'air, et induirait un accroissement de 60 % de l'accumulation de carbone terrestre. Par contre, elle causerait une baisse de la production primaire des océans. (Jiang, Zhang, Cao, 2018) De plus, l'emploi de cette approche pourrait aussi provoquer une réduction des précipitations, et une modification de la distribution de la chaleur et des précipitations à l'échelle globale (Irvine et Ridgwell, 2009). Une simulation récente a permis de constater un changement dans la circulation atmosphérique dans les régions tropicales généré par la mise en œuvre de cette technologie (Guo, Moore et Duoying, 2018).

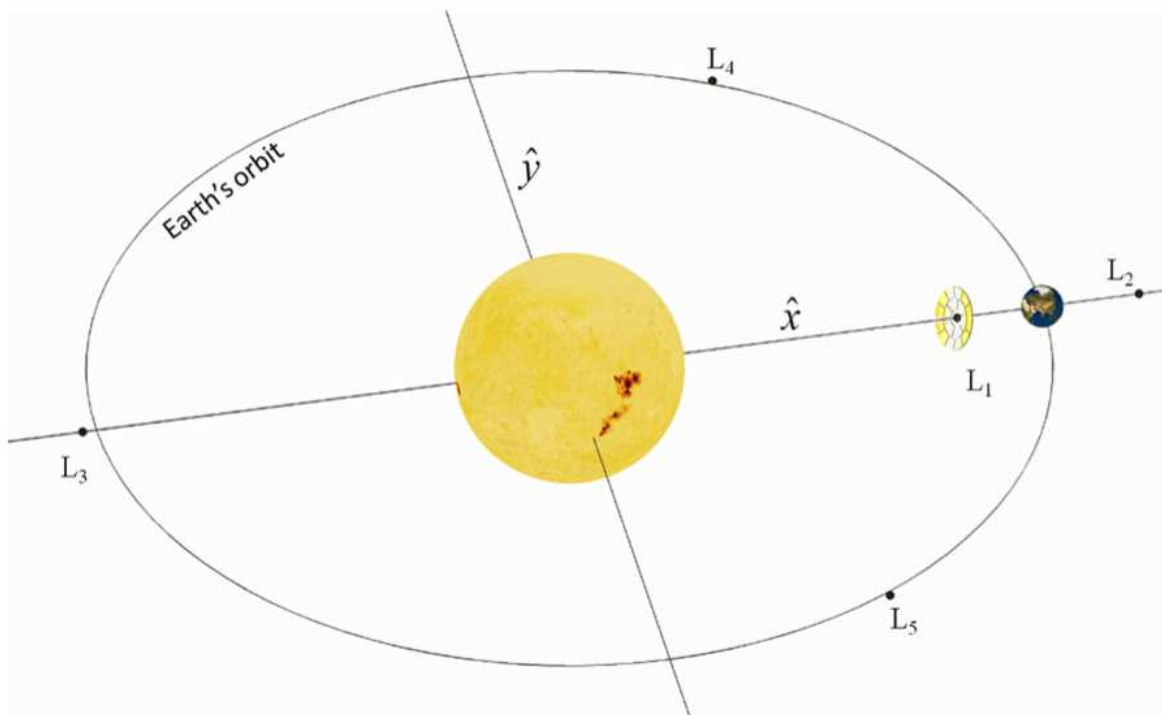


Figure 2.4 Miroir réfléchissant près du point L1 de Lagrange Soleil-Terre (tiré de : Sánchez et McInnes, 2015, p. 3)

En résumé, le déploiement de cette technologie est non envisageable à court ou moyen terme à cause de son coût élevé, ses impacts non bien établis et le temps de mise en œuvre qui est très lent. De plus, elle comporte beaucoup de contraintes comme celles indiquées par Kunzig, (2008) :

- Coût très élevé
- Temps de construction des équipements nécessaires très lent
- Changements imprévisibles dans les vents et les précipitations régionales
- Évaporation réduite ce qui provoque une diminution des précipitations globales
- Remplacement des miroirs serait requis après 50 ans. Un retard ou défaillance pour fabriquer de nouveaux équipements pourrait entraîner un réchauffement rapide de la Terre
- Difficulté de convaincre les gens que ces miroirs ne seront pas utilisés comme une arme pour modifier les conditions lumineuses dans les différentes régions de la Terre

Tableau 2.7 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par les miroirs réfléchissants dans l'espace
(inspiré de : Caldeira et al., 2013; Guo et al., 2018; Hickman, 2018; Jiang et al., 2018; USGAO, 2011; Vaughan et Lenton, 2011)

Miroirs réfléchissants dans l'espace	
Potentiel d'atténuation de la température globale	<ul style="list-style-type: none"> • Élevé • FR : -3,7 W m⁻²
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Atténuation rapide de la température globale • Aucune modification chimique de l'atmosphère • Développement technologique et économique lié à l'exploration spatiale
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie des miroirs • Nécessite des technologies très avancées • Très grande dépense énergétique
Risques potentiels	<ul style="list-style-type: none"> • Peu connus • Changement dans le cycle de carbone • Diminution des précipitations • Changement dans le cycle hydrologique
Coût	<ul style="list-style-type: none"> • Élevé • 1,3 à 5 mille milliards \$ US
État de développement	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation par modélisation uniquement • Pas d'expériences en conditions réelles

2.2 Technologies de retrait de CO₂ de l'atmosphère

Comme mentionné auparavant, l'objectif de ces technologies est de diminuer la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. De ce fait, elles pourraient contribuer à rétablir la température de la Terre jusqu'à son niveau préindustriel, et de réduire l'intensité des impacts des CC. Ces technologies comportent moins de risques comparés à celles de la gestion des radiations solaires. Cependant, leur effet d'atténuation de la température globale nécessiterait plus de temps par rapport à celles-ci. En plus, certaines technologies de retrait de CO₂ atmosphérique demeurent potentiellement limitées par la capacité de stockage de ce gaz

dans les réservoirs géologiques. Les principales approches de retrait de CO₂ atmosphérique telles qu'illustrées dans la figure 2.5 comprennent :

- Le boisement/reboisement
- La séquestration de carbone dans le sol
- Le biochar
- La bioénergie avec capture et stockage du carbone
- La capture directe du CO₂ de l'air et son stockage
- L'augmentation de l'altération des roches et l'ajustement de l'alcalinité des océans
- La fertilisation des océans

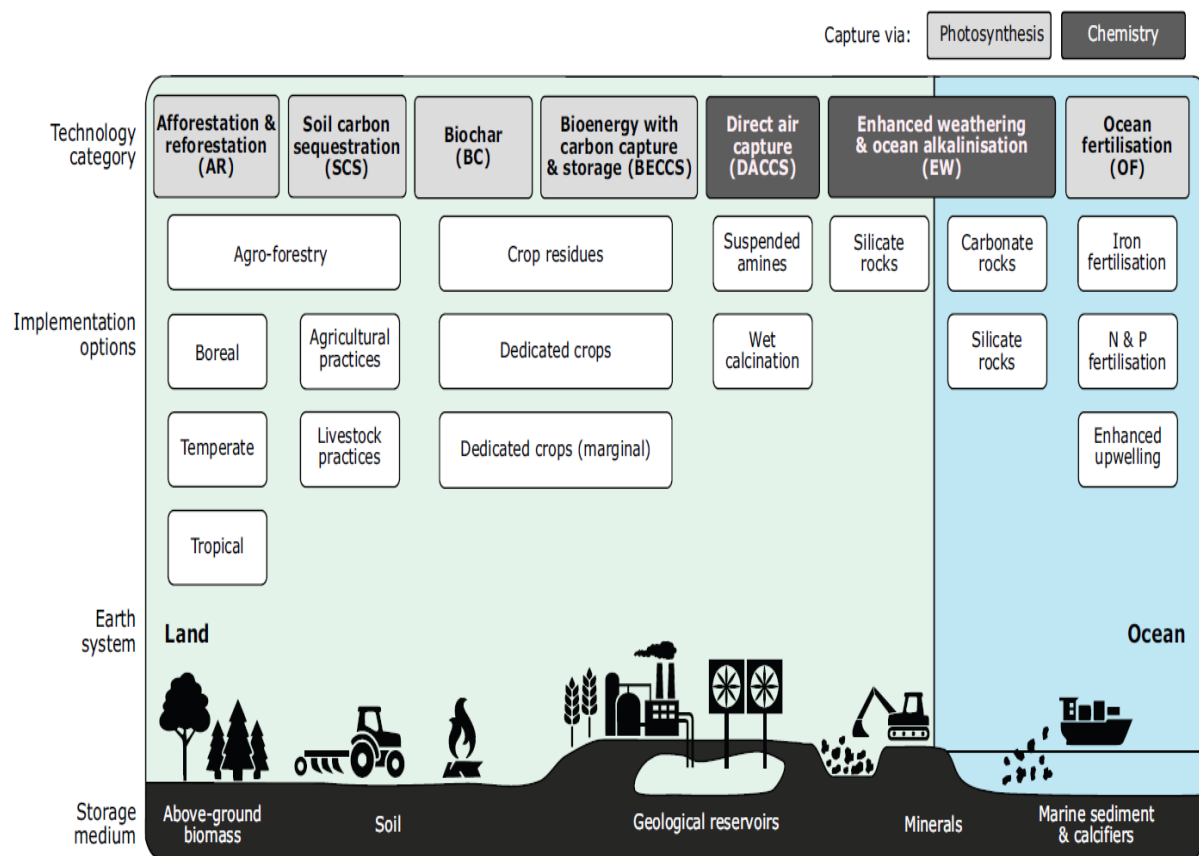


Figure 2.5 Illustration des différentes technologies de retrait de CO₂ atmosphérique (tiré de : Minx et al., 2018, p. 6)

2.2.1 Capture directe de CO₂ dans l'air et son stockage

Cette technologie vise à éliminer le CO₂ présent dans l'atmosphère par la captation de ce gaz à partir d'un grand volume d'air ambiant qui circule dans un équipement permettant une purification du CO₂ (figure 2.6). Ainsi, la séparation du CO₂ des autres composés chimiques présents dans l'air se fait grâce à des procédés

chimiques capables d'adsorber de façon sélective les molécules de CO₂. Pour se faire, au moins trois méthodes ont été proposées pour réaliser cette purification du CO₂ (Caldeira et al., 2013; Tucker, 2018; *National Research Council*, 2015) :

- Absorption avec une solution très alcaline notamment l'hydroxyde de sodium
- Absorption avec une solution moyennement alcaline en présence d'un catalyseur
- Adsorption avec un solide sous forme de résine synthétique impliquant un échange d'ions

Le CO₂ purifié par l'une de ces méthodes est d'abord compressé, transporté par pipeline ou autre moyen, et stocké ensuite à long terme dans des réservoirs géologiques souterrains ou dans les fonds des océans (figure 2.6). Le CO₂ peut être également vendu pour diverses utilisations industrielles comme l'industrie chimique pour la fabrication d'une variété de produits utiles (Bui et al., 2018; Huisinigh, Zhang, Moore, Qiao, et Li, 2015).

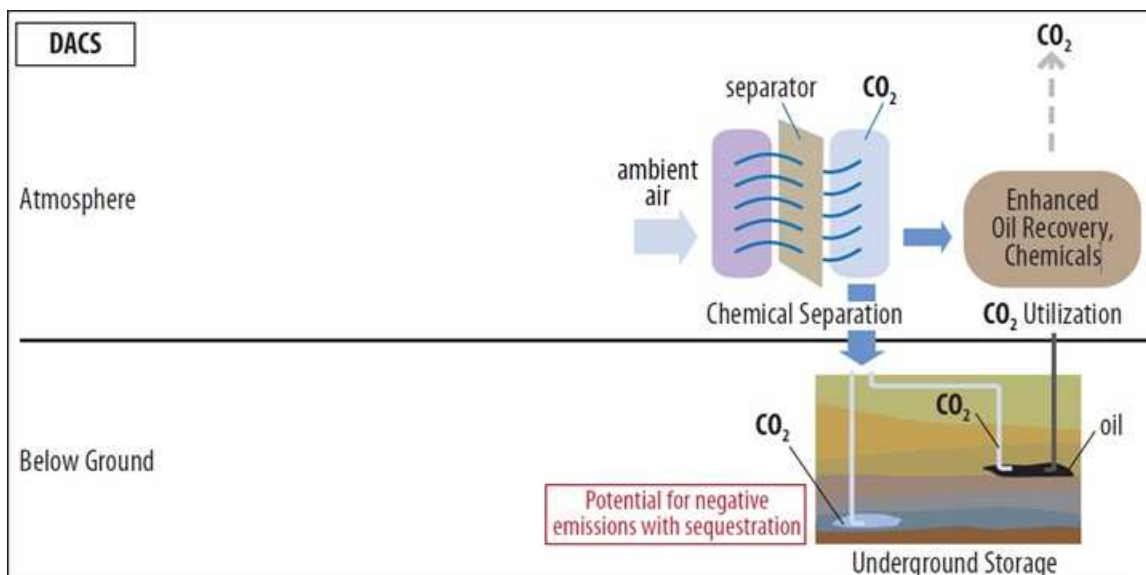


Figure 2.6 Principe de base de la technologie de capture directe de CO₂ dans l'air ambiant et son stockage (tiré de : *National Research Council*, 2015, p. 35)

La capture directe de CO₂ dans l'air pourrait théoriquement éliminer des concentrations de CO₂ atmosphérique supérieures à 20 Gt CO₂ par an (*United Nations Environment Programme* [UNEP], 2017; USGAO, 2011). D'autres études ont rapporté un potentiel égal à 10-12 Gt CO₂/an (Minx et al., 2018; Psarras et al., 2018). Cependant, Fuss et al., (2018) ont estimé un potentiel plus réaliste qui tient en compte des contraintes technologiques et des critères de durabilité liés à cette technologie. Ces auteurs ont donc établi que le potentiel de retrait de CO₂ de cette approche au niveau global serait compris entre 0,5 et 5 Gt CO₂ par an pour 2050 (tableau 2,8). Des valeurs similaires (2 à 5 Gt CO₂ par an) ont été indiquées par UNEP, (2017).

Cette approche est actuellement dans un stade de démonstration et progresse vers l'industrialisation et la commercialisation (EASAC, 2018; Minx et al., 2018; Zhang et al., 2015). Son état de développement actuel vise en particulier la valorisation de CO₂ dans différentes utilisations industrielle à la place de le stocker dans les réservoirs géologiques. En ce sens, certains projets pilotes ont été réalisés à l'échelle locale. Par exemple, la première usine de capture de CO₂ est déjà mise en œuvre à Hinwil en suisse depuis 2017 par l'entreprise *Climeworks*. Cette usine est censée capter 900 tonnes de CO₂ par an qui sera utilisé ultérieurement pour stimuler la croissance des plantes dans une serre installée à son voisinage. La compagnie cherche également d'autres valorisations pour le CO₂ capté comme son emploi en industrie de breuvage ou pour produire un hydrocarbure renouvelable. Elle espère optimiser sa technologie pour éliminer 1 % du CO₂ mondial d'origine anthropique d'ici 2025. (Daley, 2017) Un autre exemple très prometteur concerne la construction, en 2017, d'une usine pilote de captation de CO₂ par la compagnie canadienne, *Carbon Engineering*. Ce projet consiste à aspirer le CO₂ directement de l'air ambiant et le transformer en granules solides pour fabriquer des combustibles synthétiques. Le coût de ces opérations est 94-232 \$ par tonne de CO₂ capté (Keith, Holmes, St Angelo et Heidel, 2018). Le projet semble être viable économiquement grâce, entre autres, à la commercialisation potentielle du combustible provenant du CO₂ atmosphérique. Toutefois, le rendement de la réaction de transformation du CO₂ en carburant devrait encore être optimisé pour assurer une meilleure efficacité de cette conversion, et prévenir une consommation excessive d'énergie requise pour ce processus. Par ailleurs, l'emploi d'une source d'énergie renouvelable est souhaitable pour éviter une émission additionnelle de CO₂, et défavoriser les effets bénéfiques espérés de cette valorisation de ce gaz.

La principale contrainte de cette technologie concerne la capacité de stockage de CO₂ dans les formations géologiques ou océaniques de façon sécuritaire, et qui devrait être suffisante pour permettre l'atténuation des impacts des CC (EASAC, 2018). Une deuxième contrainte porte sur le traitement de très faible concentration de CO₂ (équivalente à 0,04 % de l'air) présente dans l'air ambiant (Tucker, 2018). En effet, ses équipements de captation de l'air ne seraient pas installés à proximité de la source des émissions de CO₂, comme c'est le cas pour les techniques de captation de CO₂ à l'embouchure des cheminées des grands émetteurs de GES. De ce fait, la concentration de CO₂ dans l'air est 100 à 300 fois plus faible que celle dans les gaz de combustion d'une centrale alimentée au gaz ou au charbon, respectivement. Ainsi, plus la concentration de CO₂ est faible plus la consommation énergétique de cette approche sera élevée. Pour cette raison, le coût de la capture directe de CO₂ dans l'air ambiant serait plus important d'environ 2 à 10 fois que celui capté à la source d'émission. (*National Research Council*, 2015) La technologie de capture directe de CO₂ dans l'air doit donc traiter une grande quantité d'air pour extraire suffisamment de CO₂, ce qui augmente ses dépenses opérationnelles (Barkakatya et al., 2017; GIEC, 2018a). Par contre, elle pourrait être construite à proximité des sites de séquestration géologique ou de l'utilisation de CO₂ afin de réduire le coût lié au transport de CO₂ capté jusqu'au réservoir de stockage (Barkakatya et al., 2017). De plus, ses activités exigent une consommation importante d'énergie et de la chaleur (environ 100 °C) pour la régénération du sorbant et la compression de CO₂ (Breyer, Fasihi et Aghahosseini, 2018; Vaughan et

Lenton, 2011). En ce sens, les besoins annuels moyens en énergie sont de l'ordre 156 EJ par an d'ici à 2100 ans (Smith, 2016; Smith et al., 2016). Pour cela, l'emploi d'une source d'énergie propre, comme l'énergie éolienne ou solaire, qui a un faible coût est recommandé afin d'augmenter sa rentabilité et son déploiement à une échelle suffisante pour atténuer les CC.

Dans la littérature, les estimations initiales des coûts pour la mise en œuvre de cette technologie montrent une grande variation qui va de 25 à 1000 \$ US par tonne de CO₂ éliminée. Mais, les évaluations récentes ont permis d'estimer des coûts plus réalistes de traitement d'environ 100 à 300 \$ US par tonne de CO₂ éliminé de l'atmosphère (tableau 2.8; Fuss et al., 2018). De ce fait, actuellement, le coût élevé et l'absence de débouchés avantageux pour le CO₂ pourraient limiter sa rentabilité, ainsi que son adoption à grande échelle. Par contre, l'emploi d'une énergie renouvelable pourrait abaisser ces coûts. En effet, Breyer et al., (2018) soulignent que le coût serait de 118,7 \$ US par tonne de CO₂ en 2030 lorsque ce type d'énergie serait utilisée. Plusieurs autres chercheurs explorent également la possibilité de réduire davantage les coûts via l'optimisation de la méthode de captation sélective de CO₂ et la diminution de la consommation énergétique de cette approche (Okesola, et al., 2018). Cela constituerait un avantage pour son déploiement potentiel dans les pays en voie de développement.

Tableau 2.8 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par la capture directe de CO₂ dans l'air et son stockage (inspiré de : Barkakatya et al., 2017; Boysen, Lucht et Gerten, 2017; EASAC, 2018; Fuss et al., 2018; Kuppasamy, Thavamani, Megharaj, Venkateswarlu et Naidub, 2016; Minx et al., 2018; *National Research Council*, 2015; UNEP, 2017; USGAO, 2011; Vaughan et al., 2018)

La capture directe de CO ₂ de l'air et son stockage	
Potentiel de retrait de CO ₂ (Gt CO ₂ /an)	<ul style="list-style-type: none"> • Contribue partiellement à l'atténuation des CC • 0,5-5
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Diminue la concentration du CO₂ atmosphérique • Peu d'impacts environnementaux sont connus • Elle n'est pas limitée par la disponibilité des matières premières • Dispositifs de captation de CO₂ sont déjà en état de commercialisation et de développement
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de stockage de CO₂ dans les réservoirs • Consommation d'énergie fossile • Libération imprévisible de CO₂ des réservoirs
Risque potentiel	<ul style="list-style-type: none"> • Libération de CO₂ dans l'air en cas de fuite accidentelle des réservoirs géologiques
Coût (\$ US/t CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 100-300
État d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> • Démonstration/commercialisation • Déployée dans plusieurs niches de marché

Dans les études scientifiques publiées, très peu de risques environnementaux ou climatiques ont été associés à l'emploi de cette approche (tableau 2.8) (Fuss et al., 2018). Le principal risque rapporté concerne l'impact de l'accroissement de la pression lors de l'injection de grandes quantités de CO₂ dans les lieux de stockage souterrain (Bui et al., 2018; EASAC, 2018; *National Research Council*, 2015). En ce sens, une pression élevée pourrait induire des événements sismiques dans les formations géologiques des réservoirs,

ce qui pourrait causer la fuite de CO₂ dans l'environnement. Pour éviter ce problème, des chercheurs ont suggéré de stocker le CO₂ capté sous forme solide après sa transformation en minéraux carbonatés (Breyer et al., 2018). Récemment, plusieurs techniques de minéralisation du CO₂ ont été explorées afin d'évaluer leur faisabilité économique pour produire des minéraux stables provenant de la conversion chimique de ce gaz, et ce à faibles coûts (Naraharisetti, Yeo et Bu, 2018).

En résumé, cette technologie progresse vers un stade de maturité avancé. Son potentiel d'élimination du CO₂ a été démontré via les quelques premières usines pilotes. Mais, sa rentabilité dépend de la source d'énergie employée pour diminuer ses coûts énergétiques, de la réutilisation éventuelle de CO₂, et le stockage continu de CO₂ de manière sécuritaire. Son déploiement à court terme (d'ici 5 ans) sur une grande échelle est peu probable pour le moment.

2.2.2 Bioénergie avec capture et stockage de carbone

Lors de leur développement, les plantes captent une certaine quantité de CO₂ via les processus photochimiques de la photosynthèse et l'intègrent dans leur biomasse pour le besoin de leur croissance. Cette biomasse (plantes, arbres et leurs résidus) peut être récoltée et valorisée comme combustible pour générer l'électricité (figure 2.7).

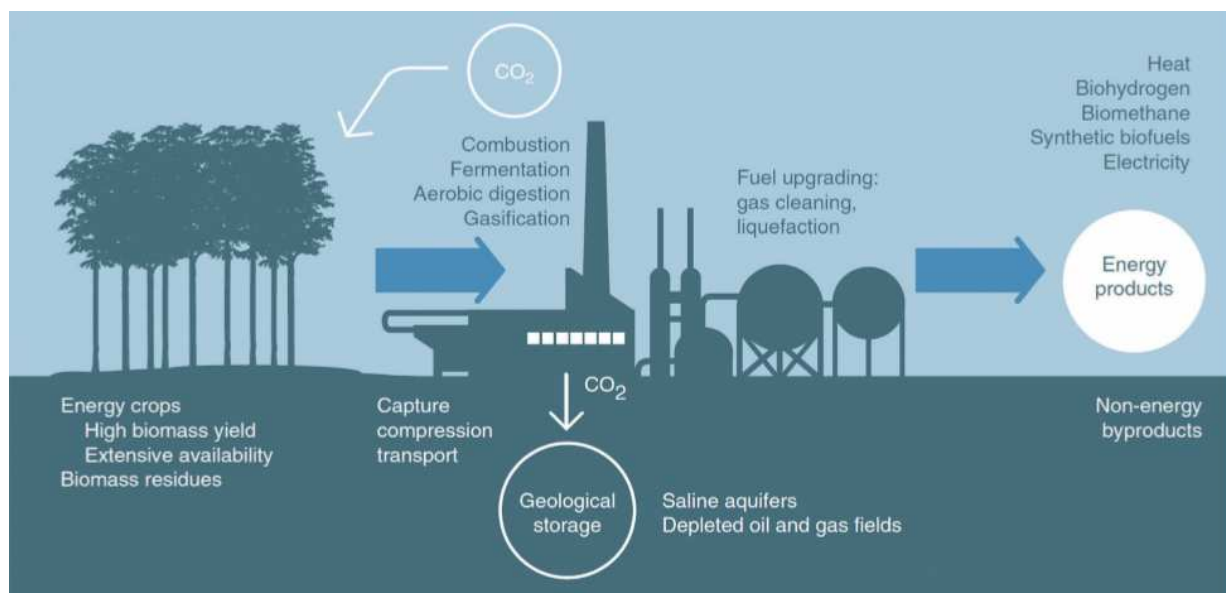


Figure 2.7 Concept de la technologie de bioénergie avec capture et stockage de CO₂ (tiré de : Bui et al., 2018, p. 1126)

La bioénergie avec capture et stockage de carbone (BECCS) a pour objectif d'utiliser la biomasse végétale comme alternative aux énergies fossiles pour produire l'électricité. En ce sens, la combustion de cette biomasse libère le CO₂ qui est capté puis stocké dans les formations souterraines ou les fonds marins. Ce processus est considéré donc à émissions négatives en CO₂. La méthode de BECCS nécessite le

déploiement de deux technologies soit : la production de la biomasse végétale pour générer l'énergie, et la capture de CO₂ et son stockage (Bui et al., 2018; Zhang et al., 2015).

Plusieurs études ont tenté d'estimer l'efficacité de la BECSC pour atténuer les CC. Selon Fuss et al., (2018), le potentiel réaliste de retrait de CO₂ de cette approche serait de l'ordre de 0,5 à 5 Gt CO₂ par an (tableau 2.9). Il est similaire à celle de la technologie de capture directe de CO₂ dans l'air présentée auparavant. D'autres chercheurs ont indiqué que la BECSC pourrait avoir un potentiel de retrait du CO₂ plus élevé compris entre 2,4 et 12 Gt de CO₂ par an (EASAC, 2018; Minx et al., 2018; Psarras et al., 2018). Toutefois, l'efficacité de cette technologie semble être dépendante de plusieurs facteurs. Ces derniers sont la productivité des plantes, la saison de la croissance de celles-ci, la consommation d'eau et la disponibilité des terres pour produire la biomasse (EASAC, 2018; Minx et al., 2018; *National Research Council*, 2015) (tableau 2.9).

Le coût de mise en œuvre de cette approche estimé dans la littérature serait moyen. Il dépend de plusieurs facteurs comme le prix des terres exploitées, le transport d'une quantité importante de biomasses jusqu'à l'installation de traitement, et le transport de CO₂ pour sa séquestration dans les réservoirs de stockage (Minx et al., 2018). En général, ils varient entre 100 à 200 \$ US par tonne de CO₂ éliminé, et ce hors coûts de transport et de stockage (tableau 2.9) (Fuss et al., 2018, Minx et al., 2018).

Tableau 2.9 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par la bioénergie avec capture et stockage de carbone (inspiré de : EASAC, 2018; GIEC, 2018a; Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018; UNEP, 2017)

Bioénergie avec capture et stockage de carbone	
Potentiel de retrait de CO ₂ (Gt CO ₂ /an)	<ul style="list-style-type: none"> • Contribue partiellement à l'atténuation des CC • 0,5-5
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer la concentration du CO₂ atmosphérique • Produire de l'énergie
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité de grandes surfaces terrestres • Productivité des plantes et saison de croissance • Vulnérable : infestation par les insectes, incendies, effets des CC, changement de lois, etc. • Disponibilité d'eau
Risques potentiels	<ul style="list-style-type: none"> • Sécurité alimentaire • Fuite du CO₂ des réservoirs de stockage • Conflit d'utilisation des terres • Consommation d'eau • Pollution des milieux naturels par les fertilisants • Effet sur la biodiversité
Coût (\$ US/t CO ₂)	• 100-200
États d'avancement	• Phase de démonstration dans plusieurs régions

La technologie de BECSC pourrait avoir plusieurs répercussions négatives sur l'environnement. En effet, elle pourrait entrer en concurrence avec d'autres utilisations des terres, comme l'agriculture, l'exploitation

forestière et les aires protégées. Elle pourrait avoir des impacts liés à la consommation d'eau et l'emploi des engrais pour la croissance des plantes (EASAC, 2018; Nemet et al., 2018). Ainsi, une contamination des milieux naturels et une altération de la biodiversité pourraient survenir suite à l'usage des fertilisants à grande échelle (Fuss et al., 2018) (tableau 2.9). De plus, son déploiement pour atténuer le réchauffement climatique globale nécessiterait de grandes surfaces terrestres d'environ 380 à 700 Mha (Smith, 2016). Pour éviter ce problème, des chercheurs ont proposé une approche alternative basée sur la production industrielle des microalgues. Ces dernières pourraient donc servir de matière première pour la technologie de BECSC. L'avantage d'utiliser ces algues concerne le fait que ces organismes ont une productivité de biomasse plus élevée que les plantes. En ce sens, ils ont besoin de beaucoup moins de terre pour produire une quantité équivalente de bioénergie ou de produits nutritifs (Greene et al., 2017).

Par ailleurs, d'autres chercheurs ont proposé de jumeler la BECCS avec une installation industrielle de production des algues placée à son voisinage, et ce pour favoriser une valorisation du CO₂ capté via cette technologie. Dans ce cas, les algues sont utilisées pour produire des protéines pour la consommation humaine et animale. La combustion de la biomasse végétale (constituée par des eucalyptus) produit de l'électricité, la chaleur, et le CO₂ dont une partie est exploitée pour la croissance des algues. Ce système fournit autant de protéines que les plantes de soja, génère 61,5 TJ d'électricité, et permet la séquestration de 29 600 tonnes de CO₂ par an (Beal, Archibald, Huntley, Greene et Johnson, 2018).

En résumé, le déploiement de la BECCS à grande échelle dépendra de la disponibilité des terres, des nutriments et de l'eau pour la croissance des plantes. Elle serait confrontée à la concurrence avec d'autres activités qui ont les mêmes besoins et notamment l'agriculture. Sa mise en œuvre à court terme (d'ici 5 ans) et à grande échelle sur le terrain est peu probable.

2.2.3 Boisement/Reboisement

L'objectif de cette technologie est d'augmenter la séquestration de CO₂, par la végétation, et ce par la gestion des activités de boisement et de reboisement dans certains terrains. Le boisement signifie une plantation des arbres dans des terres où ils n'avaient pas été cultivés dans le passé (en général 50 ans ou plus). Le terme reboisement quant à lui désigne une plantation des arbres dans des terres où les forêts étaient défrichées ou brûlées plus récemment. (UNEP, 2017; USGAO, 2011)

Le potentiel de séquestration de CO₂ par le boisement/reboisement des sols dépendrait de nombreux facteurs, comme l'emplacement régional des terres, les espèces végétales utilisées, et la phase de croissance de ces dernières. Dans la littérature scientifique, le potentiel de séquestration de CO₂ global le plus réaliste pour cette approche est présenté dans le tableau 2.10. En effet, il pourrait atteindre 0,5 à 3,6 Gt de CO₂ par an en 2050 (Fuss et al, 2018; Minx et al., 2018). Mais, des valeurs plus grandes comprises entre 1,5 et 12 Gt de CO₂ ont été reportées par d'autres études (EASAC et al., 2018; Minx et al., 2018).

Au niveau global, la séquestration de carbone par cette approche varie selon les régions climatiques. En ce sens, les forêts tropicales pourraient avoir un potentiel de séquestration de CO₂ plus élevé que celui des forêts boréales et tempérées. Cependant, plusieurs incidents naturels ou anthropiques doivent être contrôlés pour éviter une libération du CO₂ capté par l'écosystème forestier. Ces incidents concernent l'exploitation forestière, les feux de forêt, et les infestations par les insectes (Weiwei, Xiaoke, Fei, et Zhiyun, 2016). De plus, le potentiel de captation de CO₂ par le boisement/reboisement dépend de l'étendue des sols disponibles. Ce fait devrait être pris en compte pour avoir un effet significatif sur la réduction du réchauffement climatique global. À titre d'exemple, Smith et al., (2016) ont établi que la superficie requise pour stocker 4 et 12 Gt de CO₂ par an via le boisement/reboisement serait 320 et 970 Mha de terres, respectivement. Cette technologie nécessiterait donc de très vastes étendues de terres pour permettre une atténuation suffisante des CC. Elle exige également des volumes relativement importants d'eau d'environ 370 (1040 maximum) km³/an. Ainsi, elle pourrait entrer en compétition avec l'emploi de l'eau et des sols pour la production alimentaire. Elle pourrait aussi induire des effets sur la biodiversité lorsque des fertilisants sont utilisés pour stimuler la croissance des jeunes arbres (Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018). Par contre, les coûts de déploiement de cette approche pour la séquestration de CO₂ atmosphérique sont très abordables, car ils varient entre 5 à 50 \$ US/t CO₂ (Fuss et al., 2018).

La mise en œuvre de boisement/reboisement offre plusieurs avantages pour l'environnement et le climat (tableau 2.10). Par exemple, il pourrait compenser les impacts de la déforestation qui contribue de façon importante aux CC et aggrave les conséquences de ces derniers. En effet, la déforestation causerait une baisse de l'efficacité des écosystèmes à fixer le CO₂ atmosphérique, car les arbres des forêts ont la capacité de capter le CO₂ de l'air ambiant via la photosynthèse. De plus, la déforestation pourrait également favoriser les émissions du CO₂ stocké dans les écosystèmes forestiers ce qui contribuerait aux CC (Pacheco-Angulo Vilanova, Aguado, Monjardin et Martinez, 2017). De ce fait, le déploiement du boisement/reboisement pourrait contrer ces impacts négatifs de la déforestation.

Pareillement, le boisement/reboisement à petite échelle pourrait avoir d'autres bénéfices pour l'environnement comme la diminution du ruissellement des eaux pluviales, l'atténuation de l'érosion du sol ainsi que les inondations (Alves, Formiga et Traldi, 2018; Ellison et al., 2017; Kim et al., 2018). Il contribuerait également à préserver le sol et améliorer la biodiversité de la région. Par contre, dans certaines régions du monde, il pourrait conduire à une modification du climat local qui se manifeste par un refroidissement qui affecterait les écosystèmes. En effet, les grandes étendues forestières pourraient avoir un effet d'augmentation de la couverture nuageuse et donc de la réflectivité de la lumière solaire par les nuages. Cela provient du fait que les arbres auraient la capacité d'émettre dans l'atmosphère d'une certaine quantité de composés organiques volatils (COV). L'oxydation de ces derniers produirait des aérosols organiques secondaires. Ceux-ci pourraient agir comme des noyaux de condensation dans les nuages, ce qui favorise la formation des nuages et influence le climat (Brilli et al., 2016; Ellison et al., 2017). Par conséquent, le boisement/reboisement des zones tropicales entraînerait un refroidissement net du climat

local à cause de l'augmentation de la réflexion des rayons solaires par les nuages. Toutefois, il pourrait induire un effet opposé dans les régions situées dans les hautes latitudes qui en général ont une couverture neigeuse saisonnière caractérisée par un albédo élevé. Le boisement/reboisement de ces régions causerait une diminution de l'albédo en particulier en hiver qui se traduirait par un réchauffement et la fonte de la neige (Bala et al., 2007; Ellison et al., 2017). Le choix de la région doit donc être pris en considération avant l'implantation de cette technologie.

Enfin, cette approche est déjà existante via la réalisation de divers projets dans plusieurs régions. Elle pourrait être déployée à court terme pour contribuer partiellement à contrer le réchauffement de la planète dans certaines zones.

Tableau 2.10 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par le boisement/reboisement (inspiré de : Alves et al., 2018; EASAC, 2018; Ellison et al., 2017; Fuss et al., 2018; Kim et al., 2018; Minx et al., 2018; Smith, 2016; UNEP, 2017)

Boisement/Reboisement	
Potentiel de retrait de CO ₂ (Gt CO ₂ /an)	<ul style="list-style-type: none"> • Contribue partiellement à l'atténuation des CC • 0,5-3,6
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer la concentration du CO₂ atmosphérique • Réduire le ruissellement, l'érosion du sol et les inondations • Contrer la déforestation • Augmenter le stockage de carbone et les nutriments dans le sol • Améliorer la qualité des eaux souterraines
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation dans une période de décennies à des siècles • Disponibilité de grandes surfaces terrestres • Vulnérabilité aux : infestations par les insectes, incendies, changement de lois, politiques, etc. • Manque de nutriments dans le sol
Risque potentiel	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de libération de CO₂ lors de certains incidents : infestation par les insectes, incendies, etc. • Changement de l'albédo • Consommation d'eau • Conflit d'utilisation des terres • Effet sur la biodiversité • Émission de NO₂ si des fertilisants sont utilisés
Coût (\$ US/t CO ₂)	• 5-50
État d'avancement	• Technologie déjà appliquée dans différentes régions

2.2.4 La production et l'emploi du biochar

Le biochar est une matière organique riche en carbone qui est produite par combustion de résidus des plantes en absence ou en présence d'un faible apport en oxygène. Cette technique, connue sous le nom de pyrolyse, consiste à chauffer la biomasse végétale à 350 °C sous des conditions anoxiques ou à faible concentration en oxygène. Elle génère le biochar et des biocarburants (syngas et biohuile) (Whitman, Scholz et Lehmann, 2010). Une diversité de résidus de végétaux peut être employée pour former le biochar.

Par exemple, les composés suivants pourraient être utilisés : le restant de bois, les feuilles, les écorces d'arbres, les tiges de maïs, la paille, le fumier de laiterie, etc. (figure 2.8) (Kuppusamy et al., 2016; Woolf, Amonette, Street-Perrott, Lehmann, et Joseph 2010). En ce qui concerne le coût de mise en œuvre de cette technologie, il varie selon les études entre 30 à 120 \$ par tonne de CO₂ éliminé (tableau 2.11) (Fuss et al., 2018).

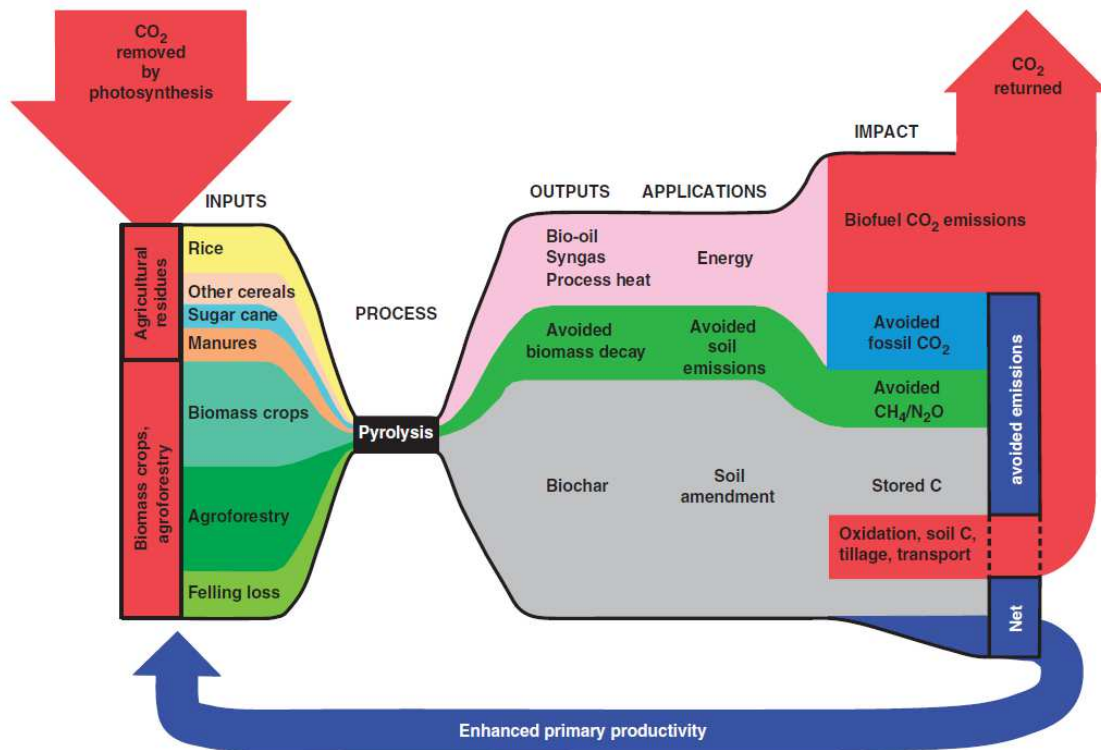


Figure 2.8 Illustration de la production du biochar par la pyrolyse d'une variété de matières premières et la formation de biocarburants et la chaleur (tiré de : Woolf et al., 2010)

Le biochar a la propriété de résister à la décomposition par les micro-organismes susceptibles de le convertir en CO₂, car les atomes de carbone qu'il contient sont très fortement liés comparés à ceux de la matière végétale initiale. Il constituerait ainsi un outil de stockage de carbone à long terme quand il est ajouté au sol (Whitman et al., 2010). Des scientifiques ont permis d'évaluer que seule une faible fraction (3 %) du biochar, désignée par le mot labile, est sensible à la biodégradation, alors que la majeure partie du biochar (97 %) est résistante à la biodégradation. Le temps moyen de résidence de ces deux fractions dans le sol a été estimé à environ 108 jours et 556 ans, pour la fraction labile et récalcitrante, respectivement. Ces résultats montrent qu'une grande partie du biochar (97 %) contribuerait directement à la séquestration à long terme du carbone dans le sol. Les auteurs de cette même étude concluent que le biochar pourrait persister dans les sols à l'échelle du centenaire, et qu'il a un effet positif sur la dynamique des matières organiques dans le sol et donc sur le stockage de carbone. (Wang, 2016)

De façon générale, le biochar fournit plusieurs avantages comme indiqué dans la figure 2.9 (Ahmed, Kurian et Raghavan, 2016; Brassard, Godbout et Raghavan, 2016; Li et al., 2017; Oliveira et al., 2017) :

- Améliorer la qualité du sol et sa structure
- Accroître le rendement des cultures agricoles, car le biochar augmente l'absorption des nutriments par les plantes et la capacité de rétention d'eau dans le sol
- Réduire la libération de certains contaminants dans l'environnement comme les métaux et différents polluants organiques
- Produire des biocarburants qui représentent une source d'énergie renouvelable
- Diminuer les émissions d'oxyde nitreux et de méthane issues dans les sols, et donc contribue à minimiser le rejet global de GES dans l'atmosphère
- Améliore la résistance des plantes à certaines infections provoquées par des champignons ou des bactéries (Hussain et al., 2016)

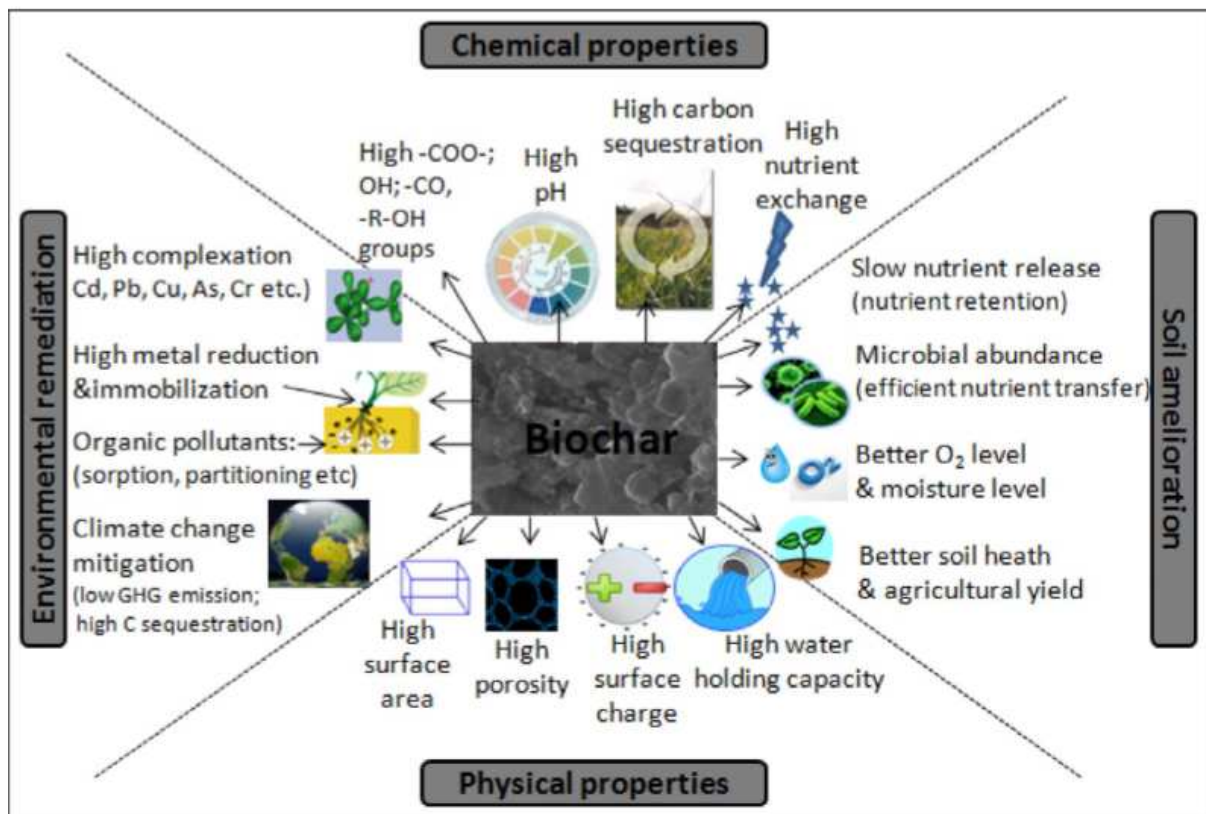


Figure 2.9 Propriétés physico-chimiques du biochar et ses différentes applications (tiré de : Oliveira et al., 2017)

La revue de la littérature scientifique montre que le potentiel de retrait de CO₂ atmosphérique par l'emploi de biochar est relativement faible comparé aux deux technologies de bioénergie et de retrait direct du CO₂ de l'air (tableau 2.11). En effet, Fuss et al., (2018) ont estimé que le potentiel de retrait de CO₂ le plus

réaliste serait d'environ 0,5 à 2 Gt de CO₂ par an en 2050. Des valeurs comprises entre 1 et 4,95 Gt de CO₂ par an ont été indiquées par d'autres études (Minx et al., 2018; UNEP, 2017). Les coûts de traitements de cette approche varient entre 30 et 120 \$ US/t CO₂ (Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018).

La littérature scientifique montre peu d'impacts négatifs potentiels du biochar sur l'environnement. Par exemple, le biochar pourrait entraîner de faibles modifications physicochimiques du sol, comme la porosité et la capacité d'échange des cations (Ahmed et al., 2016). Par ailleurs, puisque le biochar est formé à partir d'une variété de matières végétales, certains contaminants (métaux lourds ou herbicides) présents dans celles-ci pourraient s'accumuler dans le sol après application du biochar (Hussain, 2016). Dans ce cas, les producteurs de biochar devraient satisfaire les exigences minimales de la certification d'un programme de gestion de qualité comme celui de l'*International biochar Initiative* pour éviter que des composés chimiques toxiques ne se trouvent dans le sol. Un autre effet secondaire potentiel du biochar concerne une faible diminution de la biodisponibilité des herbicides et pesticides, et donc leur efficacité dans le sol lorsque ces substances devraient être utilisées en agriculture (Hussain, 2016). Toutefois, puisque ces effets ont été peu étudiés, ils devraient être analysés plus en détail pour les confirmer.

Tableau 2.11 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par l'emploi du biochar (inspiré de : EASAC, 2018; Fuss et al., 2018; Kuppusamy et al., 2016; Li et al., 2017; Minx et al., 2018; Oliveira et al., 2017; UNEP, 2017)

L'emploi du biochar	
Potentiel de retrait de CO ₂ (Gt CO ₂ /an) d'ici 2050	<ul style="list-style-type: none"> Faible en général comparé à la DACCS et la BECSS 0,5-2
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> Diminue la concentration du CO₂ atmosphérique Stockage de carbone dans le sol à long terme Génère de l'énergie Améliore la qualité du sol Augmente le rendement des cultures donc diminue l'emploi des fertilisants Ralentis la libération des contaminants dans l'environnement (y compris certains GES)
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilité des terres Disponibilité des résidus de végétaux
Risques potentiels	<ul style="list-style-type: none"> Sécurité alimentaire Changement de l'albédo
Coût (US \$/t CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> 30-120
États d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> Quelques expériences ont été effectuées à petites échelles sur le terrain Commercialisation comme amendement au sol

La production de biochar à très grande échelle pourrait être limitée par la compétition avec les différentes utilisations des terres, et en particulier avec l'agriculture. Un emploi des résidus disponibles de la biomasse végétale qui proviennent de l'agriculture et de la foresterie serait recommandé comme proposé par Woolf

et al., (2010). En addition, la technique de pyrolyse requiert de l'énergie, donc l'émission supplémentaire de GES doit être considérée si cette énergie est obtenue par des combustibles fossiles.

En résumé, les connaissances scientifiques liées à l'impact du biochar sur l'environnement à long terme ne sont pas suffisamment évaluées. Bien que cette approche soit actuellement existante, elle n'est pas encore largement appliquée. Cela est dû en partie à son coût et l'accessibilité des infrastructures pour l'installation de la pyrolyse. La disponibilité des résidus végétaux est un autre facteur clé qui limite sa mise en œuvre à grande échelle pour l'atténuation des CC. (UNEP, 2017)

2.2.5 Fertilisation des océans par des substances nutritives

La technologie de fertilisation des océans consiste à ajouter des substances nutritives, comme le fer, à la surface des océans pour stimuler la croissance de phytoplanctons. Cela favorise ainsi la captation du CO₂ par ces derniers. Lorsque ces phytoplanctons meurent, leur biomasse riche en carbone se dépose au fond de l'océan, et permettrait un stockage de carbone dans les sédiments marins. De cette façon, les océans fonctionnent comme un puits de carbone. Les estimations des coûts de mise en œuvre de cette technologie sont très variables, et pourraient être comprises entre 50 \$ à 500 \$ par tonnes de CO₂ éliminé de l'atmosphère (tableau 2.12). Cela dépendrait de la production des nutriments utilisés pour la fertilisation des océans et leur délivrance jusqu'au site de déploiement (Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018).

Les expériences réalisées en laboratoire, et les observations faites dans la nature s'accordent à ce que l'addition du fer aux océans stimule la photosynthèse chez les phytoplanctons. Les données publiées ont permis de constater que le potentiel de séquestration de carbone de la technologie de fertilisation des océans est faible. En effet, il serait inférieur à 3,6 Gt CO₂ par an (EASAC, 2018; Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018) (tableau 2.12). En ce sens, les scientifiques ont un niveau d'incertitudes très élevé quant au potentiel de cette technologie pour atténuer les CC globaux. Plusieurs d'entre eux ont estimé que le retrait de CO₂ atmosphérique par cette approche serait très limité, et que cette technologie ne semble pas viable. Elle ne serait pas efficace pour un stockage du CO₂ à long terme dans les fonds marins (EASAC, 2018; Fuss et al., 2018). En effet, pour avoir un effet significatif sur la séquestration du CO₂, une très grande productivité de phytoplanctons serait nécessaire, car la majeure partie du CO₂ fixé serait émise de nouveau dans l'air lorsque ces organismes se décomposent. De ce fait, seule une petite partie du CO₂ atteindrait le fond des océans. Pour cette raison, la séquestration du CO₂ par cette approche à long terme serait très contraignante, et limitée par la saturation potentielle des océans. (EASAC, 2018; Minx et al., 2018)

La fertilisation des océans par le fer pourrait causer plusieurs effets négatifs sur l'environnement (tableau 2.12). Par exemple, elle pourrait altérer la dynamique de la chaîne alimentaire dans les écosystèmes marins, car les phytoplanctons sont à la base de cette chaîne et sont consommés par les organismes de niveau trophique supérieur. Ainsi, la stimulation de la croissance des phytoplanctons pourrait induire le développement de certains poissons surexploités ou au contraire créer des conditions

défavorables à la survie d'autres espèces. Par exemple, la décomposition d'une grande quantité de phytoplanctons morts entraînerait des zones déficientes en oxygène jusqu'à un niveau intolérable par certaines espèces de poissons. De plus, la fertilisation des océans pourrait également générer des conditions favorables à la prolifération d'algues toxiques pour les humains. (EASAC, 2018) Des émissions supplémentaires de GES pourraient se produire comme le méthane qui provient de la dégradation des phytoplanctons (Minx et al., 2018; Williamson et al., 2012).

Les essais sur le terrain de cette technologie, à petite échelle, contribueraient à l'apport de nouvelles informations sur l'effet des nutriments sur les cycles biogéochimiques des océans. Entre 1993 et 2009, quelques expériences (autorisées ou non) ont été conduites à petite échelle dans le Pacifique, l'océan austral, et l'Atlantique tropical (Williamson et al., 2012). Cependant, la mise en œuvre à grande échelle de cette approche serait difficile à envisager, car elle provoquerait beaucoup de controverse parmi les citoyens et les environnementalistes. De plus, les grandes incertitudes scientifiques quant à son efficacité de séquestration de CO₂ ne justifient pas son emploi comme première option de géo-ingénierie à court ou moyen terme pour atténuer les CC.

Tableau 2.12 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par la fertilisation des océans (inspiré de : EASAC, 2018; Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018)

Fertilisation des océans	
Potentiel de retrait de CO ₂ (Gt CO ₂ /an)	<ul style="list-style-type: none"> • Pas efficace pour l'atténuation des CC • Moins que 3,67
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation potentielle de la productivité des poissons et donc du rendement du secteur de la pêche de poissons
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien d'une forme soluble du fer accessible aux phytoplanctons
Risques potentiels	<ul style="list-style-type: none"> • Zones anoxiques dans les océans suite à une croissance excessive des algues • Impact potentiel sur la biodiversité marine • Émission de certains GES par les océans (méthane et oxyde nitreux) après décomposition de la biomasse des algues mortes • Difficulté de contrôler les espèces de phytoplanctons qui se développent suite à la fertilisation
Coût (\$ US/t CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 50 à 500
États d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> • Phase de recherche • Quelques expériences ont été conduites en océans

2.2.6 Stimulation de l'altération de roches silicatées dans les terres ou les océans

Le processus d'altération naturelle de roches silicatées ou carbonatées a été connu dans le passé pour sa capacité de consommer une certaine quantité de CO₂ atmosphérique. Lors de la dissolution de ce dernier dans l'eau de pluie, il se transforme en acide carbonique qui a la capacité de dissoudre les roches continentales. Ce processus pourrait consommer environ 1 Gt de CO₂ par an (Strefler, Amann, Bauer, Krieglér et Hartmann, 2018). Par contre, il est très lent à se produire dans les conditions naturelles. Il

nécessiterait des dizaines de milliers d'années ou plus pour éliminer l'ensemble du CO₂ généré dans ce siècle (Caldeira et al., 2013). Pour cette raison, la technologie de la stimulation de l'altération de roches silicatées a été proposée comme mesure d'atténuation des émissions de CO₂ atmosphérique.

Cette technologie comporte des techniques qui accélèrent artificiellement ce processus, et ce par une dégradation physique et chimique des roches silicatées. Elle consiste à extraire et broyer ces roches en fines particules, puis disperser la poudre de minéraux résultante sur les terres, les sols des forêts ou dans les océans qui servent comme réacteurs pour des réactions chimiques accélérées (Fuss et al., 2018). Les poudres de roches subissent des réactions de dissolutions lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau pluviale contenant l'acide carbonique qui provient initialement du CO₂ atmosphérique. Ces réactions chimiques libèrent des produits de dissolution, dont les ions bicarbonates. Ceux-ci seront transportés ultérieurement par les rivières vers les mers et les océans où ils sont stockés dans la colonne d'eau sous forme soluble pendant des milliers d'années ou dans les sédiments marins notamment sous forme de carbonate de calcium. Les endroits les plus favorables à la mise en œuvre de cette technologie devraient être chauds et humides tels que l'Inde, le Brésil, l'Asie du Sud-Est et la Chine. (Strefler et al., 2018)

Plusieurs études ont exploré le potentiel de retrait du CO₂ atmosphérique de cette technologie pour atténuer les CC. La revue récente de EASAC, (2018) a établi que son efficacité de séquestration de carbone est d'environ 3,67 Gt de CO₂ par an d'ici la fin du siècle. Les estimations faites par Fuss et al., (2018) sont d'environ 2 à 4 Gt CO₂ par an (tableau 2.13). Ce potentiel de séquestration du CO₂ varie selon la nature des roches utilisées. Par exemple, l'olivine (0,8 tonne de CO₂ par tonne d'olivine) a une capacité de retrait de CO₂ plus élevée que celle du Basalte (0,3 tonne de CO₂ par tonne de basalte). Toutefois, l'emploi de l'olivine est déconseillé, car elle pourrait libérer des métaux lourds toxiques comme le chrome et le nickel dans l'environnement (Edwards et al., 2018).

Le coût de la technologie de stimulation de l'altération des roches est relativement important, d'environ 50 à 200 \$ US par tonne de CO₂ éliminé. Cela est lié à la grande consommation d'énergie requise pour broyer les roches en fines particules. En addition, plus le site de déploiement est situé loin de l'endroit d'extraction des roches, plus les dépenses seraient élevées (Fuss et al., 2018) (tableau 2.13). Les coûts dépendent donc de la technique employée pour le concassage des roches, l'utilisation d'énergie et le transport des matériaux.

Un des principaux facteurs limitants de cette approche est qu'elle nécessiterait une extraction minière et le transport de masses importantes de pierres (tableau 2.13). À titre d'exemple, une quantité de roches silicatées égale à 1-5 kg/m² devrait être appliquée chaque année sur 15 à 45 % de surface terrestre pour éliminer des gigatonnes de carbone requis pour contrer les CC (EASAC, 2018; Taylor et al., 2016). Une autre limitation concerne une saturation du sol tel que mentionné par Fuss et al., (2018).

Parmi les avantages de cette technologie est de corriger l'acidité des sols ou des océans, par l'ajout de bicarbonate de calcium ou de magnésium à ces milieux. Cela offre un effet bénéfique pour l'environnement (Strefler et al., 2018). Similairement, l'addition de poudre de roches aux sols pourrait fournir des minéraux utiles pour la croissance des plantes, ce qui favoriserait leur productivité (Hartmann, Moosdorf, Lauerwald, Hinderer et West, 2014). Les produits de dissolution de ces poudres de roches pourraient également diminuer la toxicité des métaux lourds dans les sols (Edwards et al., 2017). De plus, beaucoup de régions tropicales ont des sols pauvres en nutriments comme les oxisols et ultisols. Ces régions ont un taux de précipitations et des températures élevés, et représentent donc des zones à fort potentiel pour la mise en œuvre de cette technologie (Fuss et al., 2018).

Tableau 2.13 Résumé du potentiel d'atténuation des CC par altération des roches silicatées dans les terres et océans (inspiré de : EASAC, 2018; Edwards et al., 2017; Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018; Strefler, 2018; Taylor et al., 2016)

Altération des roches silicatées dans les terres et océans	
Potentiel de retrait de CO ₂ (Gt CO ₂ /an)	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité variable selon le type de roches utilisées • 2-4
Avantage	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer la concentration du CO₂ atmosphérique • Corriger l'acidité des sols et des océans • Améliorer le niveau des nutriments du sol
Facteurs affectant l'efficacité	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité, extraction et la manipulation d'une grande quantité de roches (des gigatonnes) • Saturation du sol
Risque potentiel	<ul style="list-style-type: none"> • Impacts écologiques liés à l'extraction d'une quantité importante de roches silicatées • Contamination des milieux naturels par les métaux lourds contenus dans les roches • Génération de poussières lors de l'extraction des pierres • Émission supplémentaire de GES par le transport des roches et leur traitement • Augmentation du pH des milieux naturels ce qui affecte la biodiversité • Stimulation de la croissance des phytoplanctons dans les océans
Coût (\$ US/t CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 50-200
États de développement	<ul style="list-style-type: none"> • Phase de recherche • Efficacité démontrée au laboratoire et par modélisation

Par contre, l'emploi à vaste échelle de cette approche pourrait induire beaucoup d'impacts négatifs sur la santé humaine, l'environnement et les écosystèmes. Par exemple, l'extraction d'une grande quantité de pierres, leur concassage et leur transport jusqu'au site de déploiement pourrait générer l'émission de poussières très fines dans l'air ambiant. Celles-ci risquent d'affecter la santé humaine, et de causer des nuisances aux voisinages. De plus, les extraits de roches pourraient libérer certains métaux qui contamineraient les milieux naturels et les océans, et influenceraient la biodiversité. (Fuss et al., 2018; Minx

et al., 2018) En ce sens, certains éléments présents dans les roches comme le silicium, le potassium et le phosphore pourraient stimuler une croissance accrue de phytoplanctons dans les océans ce qui affecterait l'équilibre des écosystèmes dans ces milieux (Hartman et al., 2013).

Un déploiement à grande échelle de la technologie de l'altération des roches silicatées pour le retrait du CO₂ atmosphérique exige des efforts considérables. Ces derniers concernent l'extraction minière, ainsi que le transport des roches et les produits qui en résultent jusqu'au site de déploiement. À titre d'exemple, la séquestration de 1 Gt de CO₂ atmosphérique par an nécessiterait plus de 3 Gt de roches basaltiques chaque année. Une manipulation d'une telle quantité de matériaux exige donc des infrastructures de transport adéquates et une évaluation plus rigoureuse de leurs impacts (Strefler et al., 2018). La mise en œuvre de cette approche à court terme serait très peu probable, et en particulier dans les pays en voie de développement qui manquent souvent des infrastructures routières développées. Beaucoup de recherches sont encore nécessaires pour estimer sa faisabilité et ses impacts à grande échelle.

3 ENJEUX DE LA GÉO-INGÉNIERIE

Certaines technologies de géo-ingénierie mentionnées au chapitre 2 pourraient représenter un outil intéressant pour faire face au réchauffement climatique. Cependant, les impacts de ces technologies dépasseraient les frontières nationales, car ils sont globaux et susceptibles d'avoir des conséquences imprévisibles et hétérogènes sur la planète. Ces effets comportent beaucoup d'incertitude, et se caractérisent par l'irréversibilité et la gravité des dommages potentiels. (Bourg et Hess, 2010; Lawrence et al., 2018) De ce fait, la majorité des technologies de géo-ingénierie pourraient occasionner des problématiques liées à la gouvernance, l'éthique et l'acceptabilité sociale qui doivent être discutées avant de rendre toute décision à leurs sujets. Les sous-sections suivantes résument donc ces trois enjeux de la géo-ingénierie en général.

3.1 Gouvernance et géo-ingénierie

La gouvernance représente un enjeu majeur de la géo-ingénierie, et qui reste à présent non bien défini. Une attention particulière doit être accordée à cet enjeu puisque les approches de géo-ingénierie visent une application à l'échelle planétaire. En effet, elles pourraient avoir des conséquences potentielles imprévisibles sur les biens communs que sont l'atmosphère, les océans, l'eau, l'énergie solaire, les terres et la biodiversité.

Actuellement, la question de gouvernance et de la réglementation de la géo-ingénierie n'en est qu'à l'étape d'un débat politique embryonnaire. En effet, aucun accord international n'existe encore pour encadrer l'ensemble des technologies de géo-ingénierie. Ces dernières semblent être soumises à une forme de gouvernance par défaut qui se caractérise par une réglementation inégale issue des accords multilatéraux déjà en vigueur, et une absence de réglementation spécifique à la géo-ingénierie (Talberg, Christoff, Thomas, et Karoly, 2018). Le GIEC (2018a) a rapporté qu'aucun mécanisme de gouvernance international de la géo-ingénierie n'est actuellement mis en place, sauf les activités de recherches et développement sur la fertilisation des océans. En effet, ces dernières pourraient être couvertes par la convention des Nations Unies sur la Biodiversité (CDB). Il mentionne que les outils de gouvernance, qui pourraient s'appliquer aux technologies de retrait de carbone, existants sont rares et applicables en particulier à l'échelle nationale ou régionale.

En ce sens, certains chercheurs supposent que quelques-unes de ces technologies pourraient être commanditées par des traités universels existants. Dans ce cadre, quelques entités internationales ont fait dans le passé des déclarations hâtives en matière de déploiement de la géo-ingénierie. Par exemple, en 2010, les parties de la CDB ont signifié l'interdiction de tout projet de géo-ingénierie sur le terrain qui pourrait avoir des effets négatifs potentiels sur la biodiversité (CDB, 2010ab). De même, en 2011, le parlement européen a rapporté son désaccord avec la réalisation des projets de géo-ingénierie à grande échelle (Marshall, 2011). Par contre, ces deux déclarations n'ont pas établi de contraintes juridiques pour ces

projets de la géo-ingénierie. Pourtant, elles reflètent un malaise politique vis-à-vis de l'emploi de cette approche sans réglementation adéquate et bien définie. (Macnaghten et Szerszynski, 2013)

Un système de gouvernance devrait donc être mis en place pour gérer les activités de recherches et le déploiement de la géo-ingénierie. Dans la littérature scientifique, plusieurs opinions ont été signifiées quant au type de gouvernance qui devrait encadrer la géo-ingénierie. Certains auteurs estiment qu'un petit groupe d'États devrait exécuter cette gouvernance (Bendick, 2011). D'autres proposent de créer une sorte d'institution affiliée aux Nations Unies qui serait spécialisée en gouvernance de la géo-ingénierie (Lloyd et Oppenheimer, 2014). Mais, la majorité des chercheurs pensent que la gouvernance de la géo-ingénierie devrait être organisée de façon multilatérale (Zürn et Schäfer, 2013). Selon eux, elle devrait être gérée à l'échelle mondiale, et ce par le biais des organisations internationales indépendantes qui existent déjà sur la scène politique. Par exemple, la Convention-Cadre des Nations unies sur les changements climatiques [CCNUCC] pourrait accomplir au moins une partie de cette responsabilité, ce qui favoriserait l'acceptation sociale internationale et transnationale de la géo-ingénierie. (Horton et Reynolds, 2016) De même, le GIEC (2018a, p. 4-53) a proposé un certain nombre d'institutions internationales potentielles qui pourraient être concernées par la gouvernance des technologies de gestion des radiations solaire. Parmi ces institutions sont citées la CCNUCC, la CDB, l'organisation météorologique mondiale [OMM], l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture [UNESCO], et le Programme des Nations unies pour l'environnement. Il insiste sur le fait d'avoir une gouvernance adaptée pour chaque technologie de la géo-ingénierie qui impliquerait probablement plusieurs États afin d'éviter le déploiement unilatéral de cette approche.

Pareillement, plusieurs chercheurs ont proposé également un système de gouvernance polycentrique ou partagé qui implique les institutions internationales en vigueur afin d'encadrer les technologies de gestion des radiations solaires (GRS) (Nicholson, Jinnah, et Gillespie, 2018). Selon eux, la gouvernance de ces technologies à court terme devrait s'appuyer sur au moins trois des outils suivants :

- Un mécanisme de transparence pour la recherche sur les approches de GRS
- Un forum international pour faciliter la participation du public au débat sur la géo-ingénierie
- L'intégration de l'évaluation des technologies de GRS dans le bilan mondial des progrès en matière de lutte contre les CC qui sera établi dans le cadre de l'accord de Paris

En plus de ces opinions, quelques experts pensent que la gouvernance de géo-ingénierie devrait employer une combinaison de lois souples et de lois plus rigides. Elle devrait se baser sur des principes d'intérêt public et de transparence lors de la prise de décisions. Elle devrait également veiller à consulter en amont des représentants de différents États, et le public en général avant d'autoriser une activité de géo-ingénierie. (Corner, Pidgeon et Parkhill, 2012)

En ce qui concerne la gouvernance des activités de recherche sur la géo-ingénierie, elle devrait plutôt utiliser des outils souples pour encourager des projets de recherche sécuritaires en laboratoire ou à petite échelle. Dans ce cas, ces activités devraient être gérées via des outils de gouvernance tels que la permissivité du laissez-faire, l'autorégulation, les politiques nationales indépendantes ou un consortium informel de pays. Cependant, la plupart des opinions affirment que la gouvernance de ces recherches devrait adopter des outils plus sévères avant tout déploiement à grande échelle, et ce par le biais d'un organisme multilatéral et international comme les Nations Unies. (Macnaghten et Szerszynski, 2013; Virgoe, 2009)

Le manque de gouvernance de l'ingénierie climatique a mené récemment à la création d'une initiative de gouvernance de la géo-ingénierie aux États-Unis. Elle concerne la *Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative* qui réunit des acteurs de divers horizons sociaux, géographiques et professionnels. Elle a pour mission de promouvoir et élargir le débat sur l'importance d'adopter un système de gouvernance pour la géo-ingénierie. Son objectif principal est d'éclairer les décideurs sur la gestion de risque éthique de la géo-ingénierie, et ce sur la base de résultats des recherches conduites dans ce domaine. (Pasztor, 2017) Tout dernièrement (le 10 octobre 2018), le directeur général (J. Pasztor) de cet organisme a mentionné l'urgence d'établir une gouvernance adéquate pour la géo-ingénierie en réponse au dernier rapport de GIEC (Pasztor, 2018). Ce rapport a suggéré une considération de l'emploi potentiel de la technologie d'élimination de CO₂ à grande échelle, et un examen initial des défis liés aux approches de gestion des radiations solaires (GIEC, 2018a). La *Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative* invite donc davantage de pays de mener des discussions publiques sur les CC, et la gouvernance de la géo-ingénierie. Elle encourage en particulier les populations vulnérables aux impacts négatifs des CC de s'impliquer dans ce débat international. Elle précise que chaque technologie de géo-ingénierie nécessiterait des exigences de gouvernance spécifique, et que pour cette raison elles devraient probablement être encadrées de manière distincte (Pasztor, 2018). Par exemple, l'emploi potentiel de boisement ou de la bioénergie avec capture et stockage du carbone pourraient entrer en conflit avec les autres utilisations des terres. Ces deux approches pourraient avoir des impacts éventuels sur l'agriculture, la production alimentaire, et la biodiversité (GIEC, 2018b; Pasztor, 2018). Pour cela, le GIEC (2018b) affirme, dans son rapport spécial (p. 23), le besoin d'élaborer une gouvernance efficace pour ses deux technologies afin de limiter ces compromis et d'assurer la permanence de l'élimination du carbone dans les réservoirs océaniques ou géologiques.

En général, l'organisme qui a le mandat de la gouvernance internationale de la géo-ingénierie devrait être choisi par consensus et aura de grands défis à gérer. Selon Bodansky (2013), cet organisme devrait accomplir deux rôles principaux. Le premier est de faciliter et promouvoir les projets de recherche sur la géo-ingénierie pour mieux comprendre la faisabilité, les coûts réels, les risques et les avantages de ces technologies. Le deuxième consiste à définir des règles générales pour le déploiement de la géo-ingénierie. Ces dernières permettront, d'une part, d'éviter que des acteurs exercent la géo-ingénierie de façon

unilatérale selon leurs intérêts, ce qui déclencherait des conflits géopolitiques entre les différents pays. D'autre part, ces règles devraient assurer les sujets suivants (Bodansky, 2013) :

- Protéger l'altération de la couche d'ozone qui pourrait se produire lors de l'emploi des aérosols stratosphériques;
- Promouvoir le libre-échange d'informations sur la géo-ingénierie entre les États;
- Gérer de manière équitable entre les différents pays les bénéfices et les risques qui découlent du déploiement de la géo-ingénierie;
- Considérer les intérêts de l'ensemble des nations lors de la prise de décisions liées à la géo-ingénierie

En plus de mettre en place des règles générales, l'organisme qui a la responsabilité de gouvernance internationale de la géo-ingénierie pourrait également établir des décisions au cas par cas. Par exemple, ces décisions permettraient de résoudre un litige lié à ces activités (Bodansky, 2013).

Bien qu'aucun accord international sur la géo-ingénierie n'est disponible actuellement, un certain nombre de traités internationaux existants pourraient être pertinents pour encadrer la géo-ingénierie. Cela concerne les principes ou accords suivants (Bodansky, 2013; Boucher et al., 2014) :

- Principes généraux comme l'obligation de prévenir les dommages transfrontières, le principe de précaution, et le principe d'équité intergénérationnelle
- Normes conventionnelles telles que la convention sur l'interdiction d'utiliser des techniques de modification de l'environnement à des fins militaires ou tout autre but hostile (*Environmental Modification Convention*, art. I, 1977). Cependant, cette convention n'engloberait pas directement la géo-ingénierie, car celle-ci n'a pas un objectif hostile (Boucher et al., 2014). Par contre, elle pourrait avoir un but militaire si employée par des organismes malintentionnés.
- Devoir de protéger et préserver le milieu marin tel que visé par la convention des Nations Unies sur le droit de la mer [CNUDM], art. 192; 1994). Cette dernière pourrait être concernée par les technologies de géo-ingénierie qui interviennent en milieu marin comme la fertilisation des océans et l'augmentation de l'albédo marin.
- La CCNUCC dont l'un de ces objectifs consiste à prévenir des interférences anthropiques dangereuses avec le climat (CCNUCC, art. 2, 1992). Ainsi, elle pourrait potentiellement couvrir le domaine de la géo-ingénierie (Boucher et al., 2014). De plus, Pasztor (2018) a mentionné également que la CCNUCC considère que les mesures de réduction et d'absorption des émissions de CO₂ font partie des efforts d'atténuation des CC. La *Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative* a donc commencé à identifier les outils de gouvernance qui pourraient ou non s'appliquer aux technologies de retrait de CO₂ atmosphérique dans le cadre de la CCNUCC.

- Décisions d'institutions internationales, telles que la convention de Londres et la CDB. Ces dernières pourraient être impliquées dans la régulation des projets de fertilisation des océans (CDB, 2010ab, paragraphe 8 [w] et 9 [l]; convention de Londres, 2008, paragraphe 8) (Bodansky, 2013). En effet, selon Boucher et al., (2014), la conférence des parties de la CDB « a approuvé un texte interdisant le déploiement de techniques d'ingénierie climatique en 2010 [...]. Toutefois, ce texte n'est pas contraignant, et autorise les expériences justifiées par les besoins de la recherche » (p. 45).
- Le protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone. Ce dernier serait une contrainte pour la technologie des aérosols stratosphériques, car ceux-ci pourraient avoir des impacts potentiels sur l'ozone stratosphérique (Boucher et al., 2014).
- Règles élaborées par des acteurs non gouvernementaux, telles que les principes d'Oxford de gouvernance de la géo-ingénierie. Ces principes ont pour objectif d'encadrer la recherche dans le domaine de géo-ingénierie, et ce de la manière suivante (Rayner et al., 2013) :
 - ✓ Réglementation de la géo-ingénierie comme un bien public
 - ✓ Participation du public dans le processus de décision
 - ✓ Divulgence et publication ouverte des résultats de la recherche
 - ✓ Nécessité d'une évaluation indépendante des impacts de la recherche en géo-ingénierie
 - ✓ Gouvernance avant déploiement

Enfin, Boucher et al., (2014) ont mentionné que :

« Intégrer la recherche sur la géo-ingénierie dans les accords ou des traités internationaux à large spectre permettrait de défendre certains intérêts fondamentaux, et notamment les principes d'égalité (géographique, générationnel) ou de légitimité, d'équilibrer les effets des risques environnementaux, d'affirmer ou de prendre des résolutions en matière de pratiques éthiques dans les protocoles de recherche » (p. 48).

De plus, des informations liées à l'utilisation et les impacts de géo-ingénierie doivent être communiqués de façon transparente aux différents pays. Donc, les systèmes de la surveillance, les rapports et la vérification seraient des aspects importants de la gouvernance en géo-ingénierie (Bodansky, 2013).

3.2 Éthique de la géo-ingénierie

Avant d'aborder quelques préoccupations éthiques de la géo-ingénierie, une définition de cette science serait appropriée pour la compréhension de ces enjeux :

« L'éthique est communément entendue comme la connaissance des valeurs fondamentales de l'existence humaine [...]. Les valeurs éthiques fondent la prise de décision et l'action conformément à un idéal admis dans un système moral donné. Elles s'expriment par exemple par les notions de bien et de mal, de correct ou de faux, de juste et d'injuste, de ce qui est

digne de respect ou non ». (Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies [COMEST], 2010, p. 19)

Les valeurs éthiques sont employées par différentes organisations sous forme de principes et de règles intégrées dans leurs politiques. Deux exemples de ces valeurs éthiques fondamentales concernent « le bien des individus et des communautés, ainsi que la solidarité et l'unité entre individus et au sein des communautés ». (COMEST, 2010, p. 20)

En résumé, l'éthique s'intéresse en premier lieu aux activités humaines et leurs impacts. Elle se fonde sur la capacité des gens à faire des choix libres et logiques parmi plusieurs possibilités qui s'offrent à eux tout en étant conscient des répercussions de ces choix. Par conséquent, « le champ de l'éthique ne se limite donc pas à des choix de valeurs, mais englobe également l'examen critique des conséquences de ces choix ». (COMEST, 2010, p. 20)

De ce fait, les préoccupations éthiques soulevées en lien avec un déploiement éventuel de la géo-ingénierie sont nombreuses et difficiles à gérer à cause de leurs complexités. Mais, quelques-unes concernent en particulier les points suivants (GIEC, 2018a; Lenferna et al., 2017; Preston, 2013) :

- Existence d'incertitude liée aux effets de ces technologies;
- Responsabilité des générations actuelles envers les générations futures, car l'emploi de la géo-ingénierie aurait un impact durable sur les populations ultérieures;
- Possibilité de détourner ou d'affaiblir les efforts d'atténuation des émissions de GES;
- Défi d'une participation mondiale adéquate à la prise de décision;
- Le consentement éclairé du public concerné;
- L'indemnisation des personnes en cas des impacts négatifs de la géo-ingénierie;
- La légitimité de manipuler intentionnellement le système climatique mondial;
- L'incompatibilité avec le développement durable de la société

En ce qui concerne les incertitudes liées aux impacts potentiels de la géo-ingénierie. La majorité de ces effets ont été estimés par des simulations effectuées par des modèles climatiques théoriques, et ils n'ont pas été confirmés par des études sur le terrain. De plus, les scientifiques ne semblent pas maîtriser et connaître toutes les conséquences environnementales et climatiques de cette approche. Ainsi, l'application du principe de précaution semble être justifiable dans ces conditions. Ce principe mentionne que « lorsque des activités humaines risquent d'aboutir à un danger moralement inacceptable, qui est scientifiquement plausible, mais incertain, des mesures doivent être prises pour éviter ou diminuer ce danger » (UNESCO, 2005, p. 14). Selon cette définition le danger moralement inacceptable est un danger pour les humains ou pour l'environnement qui est (UNESCO, 2005, p. 14) :

- « Menaçant pour la vie ou la santé humaine ou bien
- Grave et réellement irréversible ou bien
- Inévitables pour les générations présentes ou futures ou bien

- Imposé sans qu'aient été pris dûment en compte les droits humains de ceux qui le subissent »

De ce fait, l'emploi de la géo-ingénierie ne semble pas être exempt de conséquences néfastes pour l'environnement et la santé humaine que ce soit pour les générations actuelles ou futures. Elle ne satisfait pas les valeurs éthiques ni le principe de précaution. Dans l'éventualité où elle est appliquée de façon non responsable, l'ensemble des continents risquent d'être affectés de façon inéquitable. Mais, cette opinion pourrait changer lorsque les risques éventuels de la géo-ingénierie seraient bien connus et contrôlés.

La responsabilité des générations actuelles envers les générations futures représente une question éthique souvent évoquée dans le contexte des CC, et qui s'appliquerait aussi à la géo-ingénierie. Deux scénarios pourraient être émis. Le premier consiste à adopter la géo-ingénierie pour atténuer les CC. Mais, certaines technologies de géo-ingénierie pourraient créer un effet de dépendance, car une fois adoptées, elles devraient être utilisées indéfiniment par les futures générations. C'est le cas des aérosols stratosphériques dont le stock devrait être renouvelé à cause de leur durée de vie limitée. Sans un apport continu de ces particules, la température risque d'augmenter ce qui résulte en un réchauffement rapide dangereux pour la planète. Cette technologie pourrait ainsi provoquer des conflits entre les générations. Elles ne devraient pas être déployées s'il y a des doutes sur leur adoption par les générations ultérieures. Le deuxième scénario consiste à arrêter complètement les activités de recherche sur la géo-ingénierie. Dans ce cas, les générations futures auraient peu de chance ou des possibilités limitées pour contrer les CC. (Leal-Arcas et Filis-Yelaghotis, 2012)

Une troisième préoccupation éthique évoquée est que le développement des technologies de géo-ingénierie pourrait réduire la pression sur les gouvernements pour limiter les émissions de GES, et donc leur devoir moral ou sociétal. Il pourrait aussi inciter les États et les particuliers à continuer d'utiliser l'énergie fossile au lieu d'adopter un nouveau mode de production et de consommation (Leal-Arcas et Filis-Yelaghotis, 2012). Cela génère un sentiment de crainte lié au fait qu'une solution technologique influencerait la volonté de différente partie prenante de s'engager dans les mesures d'atténuation. Cette opinion est justifiée par le fait que les solutions technologiques pourraient être plus simples et rapides et moins exigeantes que les grandes transformations sociales exigées par l'atténuation de GES. En ce sens, la limitation des technologies de gestion des radiations solaires pourrait être constatée rapidement : poursuite de l'acidification des océans en présence de concentrations élevées de CO₂; risque de réchauffement rapide si son utilisation est arretée pour une raison donnée. (Preston, 2013)

Un problème d'injustice et d'équité sociale pourrait se produire lors du déploiement de la géo-ingénierie. En effet, cette approche serait susceptible d'avoir des impacts différents selon les régions du monde. Par exemple, l'emploi des aérosols stratosphériques pourrait entraîner des modifications des variables climatiques comme la température et le régime des précipitations, et ce de manière inégale sur le globe terrestre (Lenferna et al., 2017). De la sorte, certains pays pourraient bénéficier des avantages de la géo-ingénierie, alors que d'autres risquent de connaître une dégradation des conditions climatiques. De plus,

les populations pauvres ont moins de capacité de s'adapter aux répercussions des CC, et n'ont presque pas de voix dans les délibérations internationales. Elles seraient ainsi très vulnérables aux effets négatifs potentiels de la géo-ingénierie (Olson, 2011). Dans ce cadre, l'un des défis majeurs de la gouvernance serait d'éviter l'injustice mondiale par la considération des impacts inégaux ou disproportionnés que la géo-ingénierie pourrait causer au niveau planétaire (Lenferna et al., 2017). Une autre complication éthique qui devrait être explorée en détail est de savoir si une compensation devait être accordée aux personnes qui seraient affectées par les conséquences négatives possibles de la géo-ingénierie (Lenferna et al., 2017). Si la réponse est positive, la question suivante se pose : qui devrait payer pour cette indemnisation?

Similairement, les pays qui ont la capacité de déployer les technologies de géo-ingénierie pourraient avoir un grand pouvoir d'influence sur la prise de décision en faveur de l'adoption de la géo-ingénierie. Alors que les pays en développement seraient en position de dépendance envers ces pays développés, ce qui créer des conditions inéquitables entre les États. (Leal-Arcas et Filis-Yelaghotis, 2012) Pour toutes ces raisons, l'incorporation des populations vulnérables et marginalisées lors des discussions futures sur la géo-ingénierie représente une question morale importante. Cependant, puisque la géo-ingénierie impliquerait des biens communs, l'obtention d'un accord convenable à toutes les parties concernées serait une tâche laborieuse en raison de la difficulté de définir les risques sur le plan spatial et temporel. (Preston, 2013)

Enfin, le principe d'Oxford a souligné l'importance d'avoir le consentement éclairé des individus concernés pour assurer la légitimité politique pour un déploiement de la géo-ingénierie (Rayner et al., 2013). En ce sens, le principe de *All-affected* stipule que toute personne concernée par une décision a le droit d'y participer. Dans ce cas, les technologies de géo-ingénierie comme les aérosols stratosphériques qui ont un impact non homogène sur les précipitations régionales nécessiteraient un consentement des gens avant leurs utilisations. Un tel consentement serait difficile à obtenir actuellement compte tenu de la carence dans la compréhension des concepts de la géo-ingénierie, et le manque d'institutions représentatives des différentes nations de la planète. (Lenferna et al., 2017)

3.3 Acceptabilité sociale

L'acceptabilité sociale représente également un enjeu important de la géo-ingénierie. Celle-ci fait partie des technologies très contestées pour diverses raisons comme les objections fondées sur les incertitudes liées à l'irréversibilité des impacts potentiels, des questions éthiques et les grands problèmes de gouvernance transfrontalière qu'elle occasionne. En ce sens, l'engagement des citoyens en matière de géo-ingénierie devrait être une dimension intégrale de la gouvernance de cette approche, et ce à différent stade de son développement y compris la phase initiale de recherche (Boucher et al., 2014). D'ailleurs, les principes d'Oxford pour la gouvernance de la recherche sur la géo-ingénierie soulignent l'importance de la participation du public dans le processus de décision qui concerne cette approche. Il encourage également la divulgation et la publication ouverte des résultats de la recherche sur la géo-ingénierie pour permettre à

la population de se tenir informée de tous les aspects de développement de ses technologies (Rayner et al., 2013).

En général, pour toute technologie émergente, l'engagement public implique une participation de divers citoyens à une délibération sur une question scientifique ou technologique donnée. Ces délibérations devraient se faire tout au long de leurs premières phases de recherches scientifiques et de développement, avant l'étape de commercialisation. De cette façon, cette délibération en amont permettrait d'éviter la fermeture prématurée du processus de résolution d'une problématique et des options de décision qui s'offrent aux donneurs d'ordre. (Pidgeon, Parkhill, Corner et Vaughan., 2013; Stirling, 2007) Elle permettrait également d'identifier des aspects de la question ou des préoccupations fondées sur des valeurs, qui ont été jugées sans importance par les experts et les scientifiques, alors qu'ils pourraient être significatifs pour le grand public (Pidgeon et al., 2013). En ce qui concerne la géo-ingénierie, des chercheurs ont souligné que les climatologues et les experts en opinion publique devraient travailler ensemble pour comprendre la perception du public envers cette approche (Wright, Teagle et Feetham, 2014). En effet, étant donné que la géo-ingénierie est controversée, un besoin se pose pour informer les citoyens sur ses enjeux et avoir leurs opinions avant que des décisions politiques ne soient prises.

En 2010, un premier dialogue public sur la géo-ingénierie, connue sous le nom *Experiment Earth*, a été mené au Royaume-Uni. Il s'est déroulé sous forme d'une série de groupes de discussion et des sondages qualitatifs en ligne avec différentes parties prenantes. Lors de cet événement, plusieurs groupes de citoyens originaires de plusieurs régions britanniques ont été conviés pour discuter des enjeux éthiques et sociaux des projets de recherche en géo-ingénierie. Les conversations ont été initiées par des présentations scientifiques sur la géo-ingénierie, et ont été dirigées par des animateurs professionnels. Les participants ont donné leurs avis sur neuf technologies de géo-ingénierie. (Pidgeon et al., 2013) Les résultats de ce débat ont montré qu'au début, les citoyens consultés avaient une faible prise de conscience sur la géo-ingénierie. Cependant, à la fin des délibérations, la majorité de ces personnes ont eu une préférence pour les technologies de retrait de CO₂ atmosphérique. En effet, celles-ci pourraient atténuer les concentrations du CO₂ dans l'air, la cause fondamentale des CC. (Tableau 3.1; Corner, et al., 2012; Ipsos-MORI, 2010) Les facteurs clés qui pourraient affecter l'opinion publique vis-à-vis des projets de la géo-ingénierie concernent la contrôlabilité et la réversibilité de ces essais, ainsi que l'adéquation des dispositions réglementaires (tableau 3,2, Corner, et al., 2012; Ipsos-MORI, 2010). De plus, les données du tableau 3.1 et 3.2 montrent également que le jugement public et l'acceptabilité de la géo-ingénierie sont susceptibles de varier entre les différentes technologies de géo-ingénierie. Ce fait pourrait être justifié par leur différent mode d'intervention sur le système terrestre : retrait de CO₂ atmosphérique vs gestion des radiations solaire (Pidgeon et al., 2013).

Pareillement, une autre étude a été menée pour examiner la réaction du public à plusieurs technologies de géo-ingénierie. Les résultats de cette étude ont révélé qu'en général les citoyens consultés avaient une

attitude négative envers ces technologies. De plus, ils favorisent également les technologies de retrait du CO₂ plutôt que les technologies de gestion du rayonnement solaire (Wright et al., 2014). De ce fait, celles-ci ne seraient probablement acceptées par le public que dans des conditions très menaçantes qui exposent l'humanité et la biodiversité à des impacts négatifs intolérables par ces derniers. Par contre, une opinion différente a été rapportée par d'autres études. En effet, plus récemment, un sondage a été réalisé en ligne pour connaître l'acceptation sociale des technologies de gestion des radiations solaires dans plusieurs États, dont le Canada, la Chine, l'Allemagne, le Royaume-Uni et les États-Unis. Les résultats de ce sondage ont indiqué que la perception des personnes interrogées est distincte d'un pays à l'autre. Les répondants chinois ont signifié une plus grande acceptabilité des approches de gestion des radiations solaires par rapport aux citoyens nord-américains et européens. La faible acceptabilité de ces technologies au Canada et en Europe était liée au fait que ces approches pourraient altérer les milieux naturels. Ces données montrent que les pays qui sont moins préparés à atténuer les effets des CC et s'y adapter pourraient être plus favorables au déploiement des technologies de gestion des radiations solaires. Cela confirme la nécessité et la pertinence de mener un débat sur la géo-ingénierie au niveau international. (Visschers, Shi, Siegrist et Arvai, 2017)

Tableau 3.1 Résumé des opinions des participants au sondage *Experiment Earth* à propos de certaines technologies de géo-ingénierie (Inspiré de : Corner et al., 2012, p. 16 et Ipsos-MORI, 2010, p. 2)

Technologies de retrait du CO ₂ atmosphérique	Technologies de gestion de radiations solaires (GRS)
<p>Afforestation et Biochar :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rapportées souvent comme technologies préférées. • Considérées comme approches naturelles et privilégiées pour cette raison. 	<p>GRS :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elles ont obtenu moins de soutien de la part des participants, car elles ont été considérées comme n'ayant aucun effet sur la cause fondamentale des CC (GES).
<p>Fertilisation au fer des océans et le chaulage des océans :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le niveau de soutien des participants était faible envers ces technologies. 	<p>Éclaircissement des nuages et aérosols sulfatés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Étaient perçues plus positivement que les autres technologies de GRS. Mais, elles n'ont pas été approuvées par la majorité des participants.
<p>Capture directe du CO₂ atmosphérique :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soutien des participants tout au long des délibérations. • Pourrait être réalisée au niveau local sans réglementation internationale, et leurs effets seraient obtenus plus rapidement que le reboisement. 	<p>Miroirs réfléchissants dans l'espace :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elles ont été considérées comme dispendieuses et risquées.
	<p>Toits blancs réfléchissants :</p> <p>Ils ont été estimés comme inefficaces et infaisables.</p>

Plusieurs autres scientifiques ont mené une étude pour évaluer la perception des citoyens en Allemagne vis-à-vis de trois technologies de géo-ingénierie. Celles-ci sont : la gestion des radiations solaires via

l'injection de sulfate dans la stratosphère, le boisement à grande échelle et la capture de CO₂ et son stockage dans les fonds marins. Les résultats ont montré que le boisement était le plus facilement accepté comme mesure de lutte contre les CC, suivi par la capture de CO₂ et son stockage et la technologie d'aérosols sulfatés. Cette dernière a été très rejetée par les personnes interrogées. L'acceptation des trois approches a été très influencée par la gravité des CC perçue par ces citoyens, ainsi que le degré de confiance qu'ils accordent aux institutions impliquées dans les activités de géo-ingénierie. Mais, en général les personnes questionnées désapprouvent d'utiliser ces technologies comme moyen de se soustraire aux efforts d'atténuation de GES. (Braun, Merk, Pönitzsch, Rehdanz et Schmidt, 2018)

La perception de la géo-ingénierie par des populations vulnérables est essentielle pour mener un débat démocratique sur la recherche et la gouvernance de ses technologies. Dans ce but, des scientifiques ont effectué des entretiens avec des populations vulnérables du Pacifique Sud, de l'Afrique subsaharienne et de l'Arctique nord-américain pour connaître leurs opinions sur la géo-ingénierie. Les personnes interrogées dans cette expérience étaient très intéressées pour avoir des solutions aux CC, et étaient donc prêtes à soutenir la géo-ingénierie. Mais, leur acceptation de cette technologie a été qualifiée de fortement conditionnelle et très réticente. En effet, ces populations ont signifié un certain nombre de préoccupations liées à l'équité sociale et les implications politiques de la géo-ingénierie. (Carr et Yung, 2018)

Dernièrement, une série de délibération publique a été réalisée pour déterminer les facteurs qui influencent l'acceptabilité sociale de la géo-ingénierie. Les résultats de ces délibérations ont montré que la contrôlabilité des expériences de la géo-ingénierie semble être capitale pour son acceptabilité sociale. De plus, malgré la complexité de la contrôlabilité, quatre critères ont été retenus pour juger de l'acceptabilité des expériences de géo-ingénierie : (1) le degré de confinement; (2) l'incertitude entourant les résultats expérimentaux; (3) la réversibilité des impacts; et (4) l'honnêteté scientifique des recherches (Bellamy, Lezaun, et Palmer, 2017). Tandis que d'autres experts ont rapporté que le risque potentiel de la géo-ingénierie représente un des facteurs les plus importants qui influencerait l'acceptabilité sociale de la géo-ingénierie (Mercer, Keith et Sharp, 2011). Pasztor (2018) souligne que la vulgarisation et la communication des informations, et des concepts de la géo-ingénierie jouent un rôle primordial pour favoriser un engagement du public dans le débat international sur cette approche.

Une expérience en ligne avec des citoyens britanniques a montré que les participants qui ont lu une description des technologies de géo-ingénierie comme étant analogue aux processus naturels étaient plus susceptibles de soutenir la géo-ingénierie pour contrer les CC. Pour cela, les auteurs de cette expérience ont conclu que les scientifiques et les communicateurs devraient être prudents lorsqu'ils transmettent l'information sur la géo-ingénierie au grand public. Ils ne devraient pas exagérer dans la similitude entre les processus naturels et la géo-ingénierie. En effet, cela pourrait entraîner un excès d'attitude positive chez les gens envers cette approche. (Corner et Pidgeon, 2015)

En résumé, la géo-ingénierie nécessiterait un débat social afin de renseigner la population sur ces enjeux et favoriser son acceptabilité. Celle-ci semble être affectée par plusieurs facteurs, dont la gouvernance, l'éthique, ainsi que les preuves scientifiques et techniques pour démontrer son efficacité et ses effets secondaires.

Tableau 3.2 Exemple d'opinion du public envers différents critères qui pourraient influencer l'acceptation sociale de la géo-ingénierie pour compenser les CC (inspiré de : Corner et al., 2012, p. 16-17 et Ipsos-MORI, 2010, p. 2-3)

Critères	Raisonnement des participants
Effets sur les efforts d'atténuation des CC	La géo-ingénierie ne devrait pas entrer en conflit avec les efforts d'atténuation, et dans la mesure du possible, devrait augmenter ces efforts.
Soutenir les processus naturels	La majorité des participants croyaient que les systèmes naturels étaient en équilibre et autonomie. Un jugement affectif, la plupart des participants estimaient que la géo-ingénierie devrait être considérée en termes d'impacts sur les systèmes naturels. Cela a influencé leurs autres opinions sur la géo-ingénierie.
Contrôlabilité	Les scientifiques ne devraient pas interférer avec les systèmes naturels sans évaluations détaillées des conséquences de la géo-ingénierie.
Réversibilité	Les scientifiques devaient contrôler et être capables d'arrêter un projet de géo-ingénierie, et être sûrs que la recherche et le déploiement de ce dernier pourraient être inversés si nécessaire.
Efficacité	Les scientifiques devaient peser les avantages fondamentaux contre les coûts, en tenant compte de la quantité de CO ₂ éliminée, et la réduction de la température globale. Divers coûts doivent être considérés (carbone, opportunité, investissement, etc.).
Calendrier	Les gouvernements et autres autorités devaient fixer un calendrier d'action, et établir quand le besoin d'agir deviendrait une urgence. Le public devrait être informé, afin qu'il puisse donner ou retirer son soutien, et ce lorsque des nouvelles informations seraient disponibles.
Régulation et équité	Pour des questions transfrontalières, les gouvernements internationaux devaient se réunir pour rendre des décisions. Cela permettrait de garantir que les bénéfices et les risques seraient répartis équitablement au niveau global. Les conséquences à long terme de la géo-ingénierie devaient être considérées, ainsi que l'opinion des pays en développement.

4 MÉTHODOLOGIE DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE

La présente analyse a pour objectif principal d'identifier les technologies qui ont moins d'effets secondaires négatifs sur les volets environnementaux, sociaux et économiques. Cela permettrait d'utiliser ces approches comme mesures complémentaires aux efforts de réduction des émissions de GES à grande échelle en conditions réelles. Cette analyse comprendra également une comparaison de l'état d'avancement de chacune des technologies indiquées au chapitre deux. L'efficacité de retrait du CO₂ atmosphérique de certaines de ces approches est intégrée comme un critère essentiel dans le volet environnemental.

Cette analyse est effectuée selon quatre étapes représentées dans la figure 4.1. Dans un premier temps, l'ensemble des technologies de géo-ingénierie décrites dans le chapitre deux sont évaluées sur la base de leur temps de déploiement potentiel qui dépend de leur état d'avancement. Ensuite, dans la deuxième étape, les technologies sélectionnées dans la première évaluation sont distinguées selon un indicateur de contrôle temporel. Celui-ci concerne la possibilité d'arrêter la technologie rapidement, et ce à l'intérieur d'une année. Cela pourrait se faire dans l'éventualité où des impacts négatifs imprévisibles seraient survenus à un moment donné (McLaren, 2012; Vaughan et Lenton, 2011). Cet indicateur a été utilisé, car il figure parmi les facteurs qui influencent l'acceptabilité sociale de ces approches mentionnées dans le chapitre trois. À ce stade, seules les technologies qui sont susceptibles d'être contrôlées temporellement seront retenues pour l'analyse comparative pendant la dernière étape. La troisième étape consiste à sélectionner des critères relatifs aux effets secondaires potentiels de ces technologies lorsqu'elles sont mises en œuvre à grande échelle. L'outil de l'analyse multicritère est donc présenté dans cette étape. Enfin, la quatrième étape comprend une compilation des résultats de l'analyse multicritère des technologies retenues aux première et deuxième étapes. Une justification de ces résultats est également présentée.

En résumé, l'évaluation générale des technologies de géo-ingénierie étudiées tiendra en compte des indicateurs suivants (McLaren, 2012) :

- Contrôlabilité : l'utilisation de la technologie devrait être contrôlée, et ce par la possibilité de l'arrêter rapidement à un moment donné si des effets négatifs imprévus se sont produits;
- Impacts négatifs : la technologie ne devrait pas avoir des conséquences négatives inacceptables;
- Besoin d'énergie : la technologie ne devrait pas avoir une consommation d'énergie très élevée, et devrait offrir un potentiel de l'exploiter via une source d'énergie renouvelable;
- Coût : idéalement, les coûts devraient être suffisamment bas pour qu'un déploiement à grande échelle puisse être réalisable

Ainsi, le critère de contrôlabilité sera utilisé dans la première étape pour la présélection de l'ensemble des technologies étudiées. Pour les impacts négatifs, le besoin en énergie, et le coût, ils ont été intégrés parmi les autres critères choisis pour l'analyse comparative lors de la troisième étape.

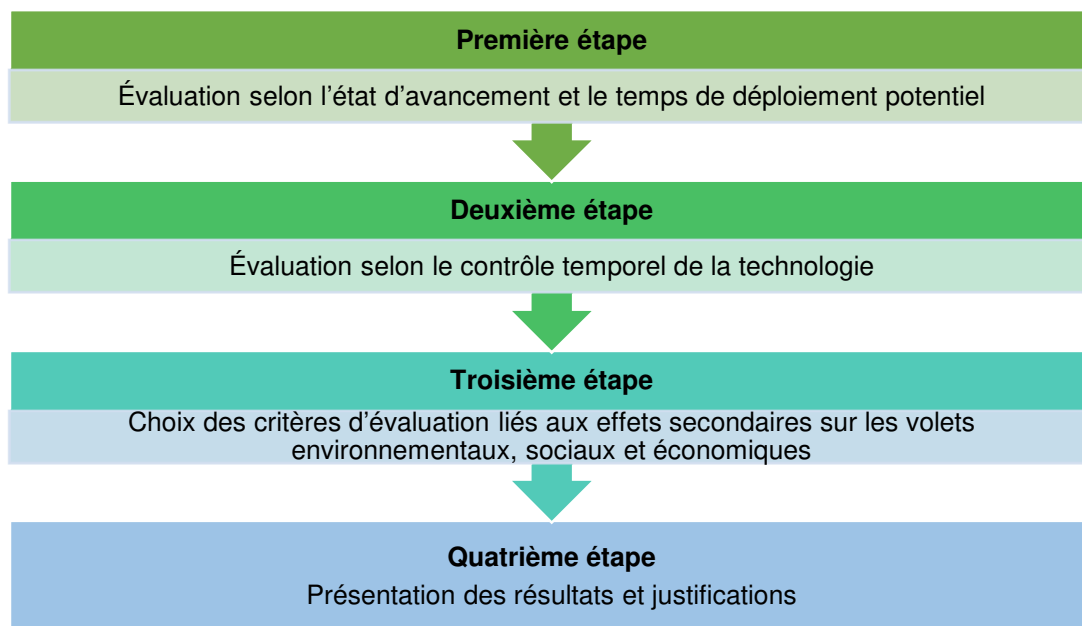


Figure 4.1 Les grandes étapes de l'analyse multicritère

4.1 Première étape

Lors de cette étape, les différentes technologies de géo-ingénierie sont évaluées en fonction de leur temps de déploiement potentiel à vaste échelle. Ce dernier tient en compte de l'état d'avancement actuel de ces approches. L'objectif de cette étape est d'identifier les approches qui sont susceptibles d'être appliquées le plus rapidement possible à court terme (d'ici 5 ans) ou à moyen terme (10 ans et plus). En général, la majorité de ces approches ne sont pas assez matures. Mais, certaines d'entre elles sont dans un stade de maturité plus avancé que d'autres. Ainsi, les technologies de retrait de CO₂, les plus avancées sont la capture directe de CO₂ dans l'air et son stockage (DACCS), la bioénergie avec capture et stockage de carbone (BECCS), le boisement/reboisement et le biochar (tableau 4.1). De même, les technologies de gestion de radiation solaire les plus avancées sont l'augmentation de l'albédo urbaine, ainsi que celle des terres cultivées et des prairies (tableau 4.2). Les technologies retenues pour la deuxième étape d'évaluation sont donc : la DACCS, la BECCS, le boisement/reboisement, le biochar, et l'augmentation de l'albédo urbaine, ainsi que celle des terres cultivées et des prairies.

4.2 Deuxième étape

Suite à la première étape, les technologies de DACCS, de BECCS, de boisement/reboisement, de biochar, d'augmentation de l'albédo urbain et celle des terres cultivées et prairies sont évaluées selon le critère de contrôle temporel (arrêt rapide de mise en œuvre de la technologie).

Les données utilisées dans l'évaluation de la deuxième étape sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2. Ils permettent de constater que toutes les technologies de retrait de CO₂ atmosphérique pourraient être

arrêtées rapidement lorsque nécessaire après leur mise en œuvre (Vaughan et Lenton et, 2011). Donc, pour donner suite à l'évaluation de la première et la deuxième étape, la DACCS, la BECCS, le boisement/reboisement, et le biochar ont été sélectionnés pour l'analyse multicritère de la quatrième étape (marquées en bleu sur le tableau 4.1). Par contre, les deux technologies d'augmentation de l'albédo urbain et celle des terres et prairies ne peuvent être arrêtées une fois appliquée à grande échelle sur le terrain sans avoir un grand impact économique et environnemental (tableau 4.2) (Vaughan et Lenton et, 2011). Pour cela, ces deux technologies ne sont pas retenues pour l'analyse de la quatrième étape. De plus, elles ont toutes les deux un faible potentiel d'atténuation de la température globale. Elles ont plutôt un effet sur la diminution de la température locale (Seneviratne et al., 2018).

Tableau 4.1 Pré-évaluation des technologies de retrait de CO₂ atmosphérique selon le temps de déploiement à grande échelle et le contrôle temporel (arrêt de mise en œuvre rapide de la technologie) (Inspiré de : EASAC, 2018; Fuss et al., 2018; Oliveira et al., 2017; Minx et al., 2018; UNEP, 2017; Vaughan et Lenton, 2011)

Critères de filtration	DACCS	BECCS	Boisement/ Reboisement	Biochar	Fertilisation des océans	Accélération de l'altération des roches
État d'avancement	Démonstration /commercialisation Déployée dans des niches de marché	Démonstration	Existante à petite échelle Prêt pour un déploiement à grande échelle	Existante Commercialisation comme amendement au sol	Recherche	Recherche
Temps de déploiement potentiel à grande échelle	10 ans et +	10 ans et +	D'ici 5 ans	10 ans et +	20 ans et +	20 ans et +
Arrêt rapide possible (< un an)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

DACCS (capture directe de CO₂ et son stockage); BECCS (bioénergie avec capture et stockage de carbone)

4.3 Troisième étape : présentation de l'outil d'analyse multicritère

Comme indiqué précédemment, l'objectif de l'analyse multicritère est de sélectionner les technologies de géo-ingénierie qui ont moins d'impacts négatifs pour leur emploi éventuel comme approches additionnelles aux efforts de réduction des émissions de GES. Les technologies de géo-ingénierie retenues dans ce but, dans les étapes précédentes, sont la DACCS, la BECCS, le boisement/reboisement et le biochar. Suite aux informations rapportées dans le deuxième et le troisième chapitre, ainsi que le tableau 4.3, ces approches présentent toutes des influences positives sur l'atténuation du CO₂ atmosphérique. Cependant, elles pourraient avoir des effets secondaires sur l'environnement, la consommation des ressources naturelles, la société en général et l'économie. Ces effets pourraient être différents d'une technologie à l'autre.

Tableau 4.2 Pré-évaluation des technologies de gestion de radiations solaires selon le temps de déploiement à grande échelle et le contrôle temporel (arrêt de mise en œuvre rapide de la technologie) (inspiré de : Carrer et al., 2018; Niemeier et Tilmes, 2017; Seneviratne et al., 2018; Vaughan et Lenton, 2011)

Critères de filtration	Aérosols stratosphériques	Augmentation de l'albédo des terres cultivées et prairies	Augmentation de l'albédo urbain	Éclaircissement des nuages marins	Augmentation de l'albédo des océans	Miroirs réfléchissants dans l'espace
État d'avancement	Recherche et développement	Technologie déjà appliquée sur le terrain	Technologie déjà existante dans certaines villes en région méditerranéenne à petite échelle	Recherche et développement	Recherche	Recherche
Temps de déploiement potentiel à grande échelle	20 ans et +	D'ici 5 ans	D'ici 5 ans	20 ans et +	20 ans et +	50 ans et +
Arrêt rapide possible (< un an)	Oui, mais il induit une augmentation rapide de la température de la Terre	Non	Non	Oui	Oui	Oui

Pour ces raisons, les critères nécessaires pour effectuer l'analyse comparative ont été choisis de manière à mettre en évidence les effets secondaires potentiels de ces approches sur la dimension environnementale, sociale et économique. Ainsi, pour chaque dimension, les critères de comparaison ont été inspirés d'outils de développement durable existants, et en particulier la grille de la Chaire en écoconseil de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) (Villeneuve, Riffon, et Tremblay, 2016) et la boussole bernoise. Ils ont été reformulés de manière à identifier les impacts potentiels positifs et négatifs de chaque technologie (tableau 4.4).

L'objectif de la mise en œuvre des technologies étudiées est de contribuer à la réduction du réchauffement climatique. Dans ce sens, seuls les critères qui sont indispensables et nécessaires pour réussir cet objectif ont été retenus. Un critère est considéré indispensable lorsque l'effet positif sur ce critère figure parmi les priorités immédiates pour l'atteinte de l'objectif précité. De même, un critère est nécessaire lorsque l'effet positif sur ce dernier est important, mais ne figure pas parmi les priorités directement visées par cet objectif (Atelier : *analyse multicritère*, 2016).

De ce fait, deux valeurs numériques de pondération ont été accordées à ces deux types de critères. La pondération la plus élevée, égale à 6, a été donnée au critère indispensable qui est le retrait de CO₂ de l'atmosphère. Une pondération moins élevée, égale à 2, a été attribuée aux critères nécessaires. Au total, 12 critères ont été sélectionnés pour l'ensemble des volets environnementaux, sociaux et économiques. Des codes ont été donnés à chaque technologie pour faciliter la présentation des informations dans l'outil de comparaison (tableau 4.5). Une échelle de cotation allant de -3 à +3 (tableau 4.6) a été utilisée pour évaluer les effets positifs et négatifs potentiels des différentes technologies sur chaque critère du tableau 4.4.

4.4 Contraintes et limites de l'analyse

L'outil utilisé dans cet essai présente certaines contraintes et limites qui pourraient influencer les résultats obtenus. En ce sens, plusieurs autres dimensions et une multitude de critères auraient pu être intégrés dans l'outil. Mais, ils n'ont pas été retenus pour plusieurs raisons, dont la disponibilité des informations dans la littérature. Par exemple, les critères liés aux volets de gouvernance n'ont pas été considérés étant donné que la gouvernance de la géo-ingénierie n'est pas encore bien développée. De même, les critères éthiques n'ont pas été inclus dans la présente analyse à cause du manque d'informations pertinentes dans la documentation qui permet d'évaluer individuellement chacune des technologies étudiées. Pour cela, les critères définitifs utilisés pour chaque dimension ont été sélectionnés de manière à ce qu'ils soient adaptés au contexte de cet essai et la disponibilité des informations.

Tableau 4.3 Synthèse des caractéristiques principales des technologies de retrait du CO₂ atmosphérique. A (Fuss et al., 2018); B (Minx et al., 2018); C (UNEP, 2017); D (Boysen, Lucht et Gerten, 2017); E (EASAC, 2018); F (Smith, 2016; Smith et al., 2016)

Indicateurs généraux	DACCS	BECCS	AR	Biochar	FO	EW
Retrait de CO₂ (Gt/an) d'ici 2050^{AB}	0,5-5	0,5-5	0,5-3,7	0,5-2	Pas efficace	2-4
Effets bénéfiques principaux	Peu d'impacts environnementaux	Produire de l'énergie par conversion de la biomasse	Réduire l'érosion du sol, les inondations et la déforestation	Produire de l'énergie par conversion de résidus de biomasse	Augmenter le rendement de la pêche de poissons	Atténuer l'acidité des sols et des océans
Facteurs limitants^{ABCDE}	-Stockage du CO ₂ -Coût	-Stockage du CO ₂ -Terres, eau et nutriments -Disponibilité de la biomasse -Climat	-Terres, eau et nutriments -Climat	-Terres pour le stockage de carbone -Approvisionnement durable en résidus de végétaux	-Saturation des océans -Apport en minéraux	-Extraction minière et transport d'une quantité massive de roches -Disponibilité des terres
Impacts négatifs potentiels^{ABCDE}	Fuite du CO ₂ des réservoirs	-Biodiversité -Sécurité alimentaire -Libération de CO ₂ ou autres GES -Pollution par les fertilisants	-Biodiversité -Sécurité alimentaire -Libération de CO ₂ ou autres GES -Pollution par les fertilisants	-Sécurité alimentaire	-Biodiversité -Extraction minière -Pollution de l'eau par les substances nutritives	-Santé humaine -Pollution de l'eau, des sols et de l'air par les métaux et les minéraux -Changement hydrologique du sol
Coûts de traitement (\$ US/t CO₂)^{AB}	100-300	100-200	5-50	30-120	50 à 500	50-200
Besoin en eau (km³/an)^F	10-300	720	370	0	ND	0,3
Besoin en énergie (EJ/an)^F	156	-170	Très faible	-14 à -35	ND	46
Demande en terre (Mha)^F	Très faible	380-700	320-970	40-260	ND	10

AR (boisement/reboisement); DACCS (capture directe de CO₂ et son stockage); BECCS (bioénergie avec capture et stockage de carbone); EW (stimulation de l'altération des roches); FO (fertilisation des océans); ND (non déterminé)

Tableau 4.4 Critères utilisés dans l'analyse comparative des technologies de géo-ingénierie

Sphère et critères	Objectif du critère
Environnement	
Atténuation du CO ₂ atmosphérique	Évaluer l'effet de la technologie sur le retrait du CO ₂ dans l'atmosphère
Limiter les conflits d'usage des terres	Estimer le risque d'entrer en compétition avec les autres utilisations des terres : agriculture, aires protégées, etc.
Préservation de la biodiversité et des écosystèmes	Déterminer l'effet potentiel de la technologie sur la biodiversité et la conservation des écosystèmes
Modification de l'albédo des surfaces terrestres	Identifier l'effet potentiel de la technologie sur le changement de l'albédo des surfaces terrestres
Social	
Acceptabilité sociale	Comparer l'acceptabilité sociale des technologies
Assurer la sécurité alimentaire	Estimer le risque de causer des contraintes sur la productivité alimentaire
Assurer l'approvisionnement en eau fraîche	Évaluer le risque d'induire des contraintes au niveau de la disponibilité d'eau fraîche dans une région donnée
Protection contre les catastrophes naturelles	Mettre en évidence le potentiel de la technologie pour prévenir des catastrophes naturelles
Économie	
Abordabilité du coût (\$/t CO ₂ éliminé)	Comparer les coûts liés au retrait d'une tonne de CO ₂ de l'atmosphère
Limiter la consommation d'énergie lors du déploiement	Apprécier le niveau de consommation d'énergie de chaque technologie
Effet sur le prix des denrées alimentaires	Déterminer le risque potentiel de causer une augmentation du prix des denrées alimentaires sur le long terme
Favoriser l'emploi d'énergie à moindre impact	Identifier les technologies qui permettent de générer de l'énergie via la conversion de la biomasse végétale et ses résidus

Le tableau 4.5 présente les technologies retenues et leur code respectif pour l'analyse multicritère suite à la pré-évaluation réalisée à la première et la deuxième étape de la méthodologie de cet essai.

Tableau 4.5 Code des technologies de géo-ingénierie utilisées pour l'analyse multicritère

Nom désigné à la technologie en français	Capture directe de CO ₂ atmosphérique et son stockage	Bioénergie avec capture et stockage du CO ₂	Boisement/Reboisement	Biochar
Nom désigné à la technologie en anglais	<i>Direct air capture and storage</i>	<i>Bioenergy with carbon capture and storage</i>	<i>Afforestation/Reforestation</i>	<i>Biochar</i>
Abréviation	DACCS	BECCS	AR	Biochar
Codes	T1	T2	T3	T4

Tableau 4.6 Pondération pour chaque critère d'analyse multicritère

Effets négatifs			Négligeable	Effets positifs		
Élevé	Moyen	Faible		Faible	Moyen	Élevé
-3	-2	-1	0	1	2	3

4.5 Quatrième étape : présentation des résultats et justification

Comme indiqué précédemment, les technologies de géo-ingénierie ont été évaluées par l'emploi des critères mentionnés dans le tableau 4.4, et ce selon les informations les plus récentes disponibles dont la majorité a été abordée aux deuxièmes et troisièmes chapitres de cet essai. Les résultats de l'analyse comparative sont présentés au tableau 4.7 pour la dimension environnementale, sociale et économique.

4.6 Résultat global

L'analyse multicritère a permis de comparer les effets secondaires des quatre technologies de géo-ingénierie étudiées selon certains critères environnementaux, sociaux et économiques. Ces différentes approches se distinguent largement par leurs effets secondaires positifs et négatifs. Les résultats ont montré que l'emploi du biochar se situe en première position, car il présente un effet global positif le plus élevé égal à 26. Le biochar a également des effets secondaires positifs au niveau des trois ensembles de critères environnementaux, sociaux et économiques. La DACCS se positionne en deuxième rang après le biochar, mais avec un résultat global positif moins élevé qui est égal à 12. Le résultat global du boisement/reboisement est positif, mais moins élevé égal à 2 ce qui le situe en troisième position. Alors que, la BECCS est située en quatrième position, car son résultat global est négatif égal à -4 (tableau 4.7). Les explications de ces résultats sont indiquées dans les sections suivantes.

4.7 Résultats de la dimension environnementale

L'analyse des résultats du volet environnement montre que les technologies qui ont moins d'impacts environnementaux, lorsqu'elles sont déployées à grande échelle, sont la DACCS et le biochar. Alors que la BECCS et le boisement/reboisement ont plusieurs effets négatifs associés aux conflits d'utilisation des terres, la préservation de la biodiversité, et la modification de l'albédo des surfaces terrestres (tableau 4.8). Les explications de ces résultats sont données aux paragraphes ci-après.

Tableau 4.7 Résultats de l'analyse comparative des technologies de géo-ingénierie étudiées. T1 : DACCS (capture directe de CO₂ atmosphérique et son stockage); T2 : BECSC (bioénergie avec capture et stockage de carbone); T3 : AR (boisement/reboisement); T4 : biochar

Sphères et Critères	Pondération	Résultats non pondérés				Résultats pondérés			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Environnement									
Atténuation du CO ₂ atmosphérique	6	3	3	2	1	18	18	12	6
Limitier les conflits d'usage des terres	2	0	-3	-3	0	0	-6	-6	0
Préservation de la biodiversité et des écosystèmes	2	0	-3	-2	2	0	-6	-4	4
Modification de l'albédo des surfaces terrestres	2	0	-2	-2	-1	0	-4	-4	-2
Total environnement :	12					18	2	-2	8
Social									
Acceptabilité sociale	2	1	-2	2	2	2	-4	4	4
Assurer la sécurité alimentaire	2	0	-3	-3	-1	0	-6	-6	-2
Assurer l'approvisionnement en eau potable	2	-1	-3	-3	0	-2	-6	-6	0
Protection contre les catastrophes naturelles	2	0	0	3	0	0	0	6	0
Total social :	8					0	-16	-2	2
Économie									
Abordabilité du coût (\$/t CO ₂ éliminé)	2	-1	2	3	2	-2	4	6	4
Faible consommation d'énergie lors du déploiement	2	-2	3	3	3	-4	6	6	6
Effet sur le prix des denrées alimentaires	2	0	-3	-3	0	0	-6	-6	0
Favoriser l'emploi d'énergie à moindre impact	2	0	3	0	3	0	6	0	6
Total économique :	8					-6	10	6	16
Technologies						T1	T2	T3	T4
Résultat global pondéré						12	-4	2	26

Tableau 4.8 Résultats de la dimension environnement. T1 : DACS (retrait direct de CO₂ atmosphérique et son stockage); T2 : BECCS (bioénergie avec capture et stockage de carbone); T3 : AR (boisement/reboisement); T4 : biochar

Sphères et Critères	Pondération	Résultats non pondérés				Résultats pondérés			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Environnement									
Atténuation du CO ₂ atmosphérique	6	3	3	2	1	18	18	12	6
Limiter les conflits d'usage des terres	2	0	-3	-3	0	0	-6	-6	0
Préservation de la biodiversité et des écosystèmes	2	0	-3	-2	2	0	-6	-4	4
Modification de l'albédo des surfaces terrestres	2	0	-2	-2	-1	0	-4	-4	-2
Total environnement :	12					18	2	-2	8

4.7.1 Atténuation du CO₂ atmosphérique

À la lumière des informations présentées dans le tableau 4.3, et en particulier les valeurs maximales du potentiel de retrait du CO₂ atmosphérique des quatre technologies étudiées, la cotation suivante leur a été donnée (tableau 4.8). La DACCS et la BECCS ont une cotation de 3, et ce sur la base de leur potentiel de retrait maximal qui est de 5 Gt CO₂/an. Le biochar présente une note de 1, car il semble avoir un potentiel maximal de l'ordre de 2 Gt CO₂/an. Celui du boisement/reboisement (environ 3,7 Gt CO₂/an) se situe entre les deux groupes : DACCS/BECCS et biochar. Pour cela une cotation de 2 a été attribuée au boisement/reboisement. (Fuss et al., 2018)

Les valeurs du potentiel du retrait du CO₂, estimées par Smith (2016), ont été également dans l'ordre décroissant suivant : DACCS et BECCS > boisement/reboisement > biochar. Cela justifie les cotations précitées données à ces quatre technologies.

4.7.2 Limiter les conflits d'usage des terres

Pour générer un effet significatif sur l'atténuation du réchauffement climatique global, les différentes technologies étudiées devraient être adoptées sur une grande échelle spatiale. Dans ce sens, la surface de terres requises pour stabiliser la température à 2 °C a été estimée en ordre décroissant (en Mha) de la façon suivante : AR (320-970 Mha), BECCS (380-700 Mha), biochar (40-260 Mha), et DACS (très faible) (tableau 4.3; Smith, 2016). Ainsi, ces données permettent de constater que la surface terrestre nécessaire pour le déploiement de la BECCS et le boisement/reboisement est plus importante que celle du biochar et la DACCS. De ce fait, la BECCS et le boisement/reboisement ont un risque très élevé d'entrer en conflit avec les autres exploitations des terres. Ces dernières concernent notamment l'agriculture et les aires naturelles protégées (Boysen et al., 2017; Heck, Gerten, Lucht et Popp, 2018; Muri, 2018; Okoro, Chickhoff et Chneider, 2018). Ce risque serait plus faible pour la DACCS et le biochar qui ont un besoin moins important en surface terrestre. De plus, les sols enrichis avec le biochar peuvent être utilisés pour d'autres activités y compris l'agriculture. Donc, le risque d'entrer en compétition avec les différentes exploitations

des terres serait négligeable pour le biochar et la DACCS. Cela justifie la cotation de 0 attribuée à ces deux dernières approches. Toutefois, une note de -3 est donnée aux deux technologies de BECCS et de boisement/reboisement (tableau 4.8).

4.7.3 Préservation de la biodiversité et des écosystèmes

Selon la revue de la littérature récente, le risque d'induire une dégradation de la biodiversité est négligeable pour la DACCS. Pour cette raison une cotation de 0 est donnée à cette technologie. De même, le biochar pourrait avoir un effet positif sur la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes. La majorité des scientifiques rapportent un effet bénéfique du biochar sur l'amélioration de la croissance des plantes, l'augmentation de la productivité agricole et la biodiversité (EASAC, 2018; Fuss et al., 2018; Oliveira et al., 2017). Plusieurs autres études ont montré que le biochar favorise la résistance des plantes aux infections causées par les nématodes, et aussi au stress induit par la sécheresse et la salinité (George, Kohler et Rillig, 2016; Huang, Ji, Gheysen, Debode et Kyndt, 2015; Shafaqat et al., 2017). De ce fait, puisque les impacts de biochar sur les écosystèmes à long terme sont peu connus une note positive, mais moins élevée égale à 2 est donnée aux effets du biochar sur la préservation de la biodiversité et les écosystèmes (tableau 4.8).

À long terme, l'exploitation de grandes surfaces terrestres pour la production de la biomasse requises pour la BECCS, ainsi que pour le boisement/reboisement pourrait avoir des effets négatifs sur les écosystèmes et la biodiversité. Ces effets pourraient être liés à la perte des habitats naturels des espèces locales après une utilisation massive des terres et un changement d'usage de ces dernières. De plus, lors de la plantation, l'emploi de fertilisants pour favoriser la croissance et la survie des jeunes arbres et des plantes pourrait provoquer une altération de la qualité des sols et des milieux aquatiques. Cela pourrait causer des impacts négatifs sur la biodiversité (Burns et Nicholson, 2017; Creutzig et al., 2015; Fuss et al., 2018; Tarr et al., 2017). L'adoption de la BECCS à grande échelle pourrait aussi induire une dégradation des forêts, comme rapportée pour la production de biocarburant de première génération, et en particulier dans les régions qui ont une faible réglementation (Creutzig et al., 2015). Une modification de la biodiversité locale pourrait survenir si des espèces non natives ou invasives sont plantées dans des terres pour générer la biomasse végétale nécessaire pour la BECCS (Robertson et al., 2017). Une note de -3 et -2 est donc accordée à la BECCS et au boisement/reboisement, respectivement, pour leurs effets potentiels sur la biodiversité et les écosystèmes (tableau 4.8).

4.7.4 Modification de l'albédo des surfaces terrestres

L'emploi de boisement/reboisement à grande échelle pourrait induire également une diminution de l'albédo des terres (Naik et Abiodun, 2016). De ce fait, il pourrait engendrer un réchauffement de la température dans certaines régions situées dans les hautes latitudes et qui ont une couverture neigeuse saisonnière (Minx et al., 2018). Pour cette raison, l'adoption du boisement dans ces régions est non recommandée, car elle pourrait accélérer la perte de la couverture de la neige (EASAC, 2018; Vaughan et Lenton, 2011; Wang,

Yan et Wang, 2014). Une note de -2 a été accordée à cette technologie (tableau 4.7). Similairement, le changement d'utilisation des terres induit par le déploiement à grande échelle de la BECCS pourrait causer une baisse de l'albédo des sols (Boysen, et al., 2017). Une note de -2 est également donnée à la BECCS (tableau 4.8).

L'emploi du biochar à l'échelle planétaire pourrait pareillement avoir un faible risque de réduire l'albédo des sols, ce qui influencerait le bilan radiatif des terres. Cet effet proviendrait de l'assombrissement potentiel de la surface du sol lorsque le biochar est ajouté à ce dernier. Une diminution de la capacité du sol à réfléchir les radiations solaires pourrait en résulter (Kuppusamy et al., 2016). Cependant, cette diminution de l'albédo n'est pas proportionnelle à l'augmentation de la quantité du biochar appliquée au sol (Zhang et al., 2018). Pour cette raison, des études plus détaillées seraient nécessaires pour confirmer et connaître l'impact réel du biochar sur l'albédo des sols. Cela justifie la note de -1 attribuée à cette approche (tableau 4.7).

4.8 Résultats de la dimension sociale

Le tableau 4.9 présente les résultats de la comparaison des technologies étudiées selon les critères de la dimension sociale. Les résultats montrent que la technologie qui est la plus favorable du point de vue social est le biochar avec un résultat total positif égal à 2. La DACCS vient en deuxième position. Le boisement/reboisement se situe en troisième rang avec un effet global négatif de -2. Alors que, la BECCS présente beaucoup d'effets secondaires négatifs ce qui la place en dernière position avec un effet global égal à -16. Les justifications de ces résultats figurent ci-après.

Tableau 4.9 Résultats de la dimension sociale. T1 : DACS (retrait direct de CO₂ atmosphérique et son stockage); T2 : BECCS (bioénergie avec capture et stockage de carbone); T3 : (boisement/reboisement); T4 : biochar

Sphères et Critères	Pondération	Résultats non pondérés				Résultats pondérés			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Social									
Acceptabilité sociale	2	1	-2	2	2	2	-4	4	4
Assurer la sécurité alimentaire	2	0	-3	-3	-1	0	-6	-6	-2
Assurer l'approvisionnement en eau potable	2	-1	-3	-3	0	-2	-6	-6	0
Protection contre les catastrophes naturelles	2	0	0	3	0	0	0	6	0
Total social :	8					0	-16	-2	2

4.8.1 Acceptabilité sociale des technologies

En général, peu d'études ont été réalisées afin de connaître l'opinion publique vis-à-vis des quatre technologies de bio-ingénierie étudiées. Mais, les études menées dans ce sens ont permis de constater que les technologies de boisement/reboisement, de biochar et de la DACCS seraient plus acceptables que la BECCS. En effet, comme pour la production de biocarburants, l'acceptabilité de la BECCS serait

confrontée à plusieurs défis. Ces derniers sont liés à l'exploitation des terres et des forêts pour la production de la biomasse, et les contraintes liées au transport d'une grande quantité de cette biomasse (Boysen et al., 2017; Kraxner et al., 2013; Nemet et al., 2018; Robledo-Abad et al., 2017). À cause de ses effets, d'autres scientifiques ont rapporté que l'adoption de la BECCS serait plus facilement acceptée si appliquée à petite échelle (Gough et Upham, 2011). En ce sens, plusieurs chercheurs ont également souligné que le déploiement de la BECCS à l'échelle planétaire serait difficile à accepter socialement (Vaughan et al., 2018; Vaughan et Gough, 2016). Selon ces mêmes auteurs, l'acceptabilité de la BECCS pourrait varier d'une région à l'autre et en fonction du temps selon l'évolution de l'opinion publique au sujet de cette approche. Pour toutes ces raisons, une cotation de -2 a été accordée à l'acceptabilité sociale de la BECCS (tableau 4.9).

En ce qui concerne le boisement/reboisement, une étude récente a montré qu'il pourrait être perçu favorablement par les citoyens comme mesure de lutte contre les CC. Les auteurs de cette étude ont démontré que l'acceptabilité publique de la DACCS est favorable, mais vient en deuxième position après le boisement/reboisement (Braun, Merk, Pönitzsch, Rehdanz et Schmidt, 2018). De plus, la DACCS a été rapportée comme approche plus acceptable que la BECCS (Nemet, 2018). Mais, puisque ces deux technologies impliqueraient un stockage du CO₂ dans les formations géologiques, une certaine désapprobation de la part du voisinage immédiat du site de stockage de CO₂ pourrait émerger lors de leur déploiement à grande échelle (Braun, 2017; Vaughan et Gough, 2016). Pourtant, ce problème pourrait être atténué en favorisant la réutilisation du CO₂ capté de l'atmosphère. Par exemple, il pourrait être exploité pour la fabrication de carburants de synthèse ou comme matière première pour la création de divers produits en industrie chimique ou pharmaceutique. Pour cette raison, une cotation de 1 et 2 a été attribuée à l'acceptabilité sociale de la DACCS, et de boisement/reboisement, respectivement (tableau 4.9).

Récemment, au Canada, le biochar a été approuvé par l'agence canadienne d'inspection des aliments dans le but de le commercialiser à l'échelle nationale comme amendement au sol (Desjardins, 2018). De plus, plusieurs compagnies ont été créées et qui sont spécialisées dans la vente de ce produit, tel que la compagnie de Biochar Canada. Une étude récente réalisée aux États-Unis a permis de remarquer un certain support public en faveur de l'emploi des résidus forestier pour la formation de biochar (Sasatani, Eastin, Bowers et Ganguly, 2017). Pour cette raison, le déploiement du biochar pourrait avoir un niveau favorable d'acceptabilité sociale dans le but de l'utiliser comme approche additionnelle à l'atténuation du réchauffement planétaire. Cela justifie la notation de 2 attribuée au biochar (tableau 4.9).

4.8.2 Assurer la sécurité alimentaire

L'utilisation des technologies de BECCS et de boisement/reboisement, à grande échelle et sur le long terme, pourrait avoir des impacts négatifs sur la sécurité alimentaire (Boysen et al., 2017; Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018). Cela provient du fait que ces deux approches nécessiteraient une surface terrestre importante pour parvenir à un effet d'atténuation significatif sur le climat, et ce comme indiqué

précédemment (tableau 4.3; Smith, 2016). De ce fait, une réduction de la proportion des terres et des ressources disponibles pour l'agriculture pourrait causer une diminution de la production alimentaire jusqu'à un niveau qui pourrait être intolérable pour la population croissante dans le futur (Yamagata et al., 2018). Une notation de -3 a été donc attribuée à ces deux technologies de BECS et de boisement/reboisement (tableau 4.9).

L'emploi du biochar à l'échelle planétaire présente également un certain risque d'entrer en compétition avec la production alimentaire à cause de son besoin en matières premières végétales qui risque de perturber l'agriculture (Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018). Mais, ce risque serait très faible comparé à celui de la BECCS et de boisement/reboisement pour plusieurs raisons. En effet, les terres enrichies par le biochar pourraient être exploitées pour d'autres utilisations des sols. De plus, le biochar est connu pour améliorer le rendement des cultures en agriculture. De même, les matières premières résiduelles requises pour la formation du biochar pourraient être obtenues à partir d'une variété de source et de résidus. Toutefois, cet approvisionnement en matières premières devrait se faire de façon respectueuse de l'environnement et du développement durable en général. Une cotation de -1 est donc attribuée à l'effet du biochar sur la sécurité alimentaire. Par contre, la DACCS a un impact négligeable sur la production alimentaire puisqu'elle a une faible demande en terre comparée aux trois autres technologies suscitées. Cela justifie la cotation de 0 donnée à cette approche (tableau 4.9).

4.8.3 Assurer l'approvisionnement en eau potable

Le déploiement des technologies de DACCS, BECCS et de boisement/reboisement à grande échelle nécessiterait une certaine consommation d'eau (tableau 4.3). La demande en eau est plus élevée pour la BECCS. Par contre, le biochar a un besoin en eau négligeable. En effet, les exigences en eau de ces quatre technologies ont été estimées de la manière suivante en ordre décroissant : BECCS (720 Km³/an) > AR (370 Km³/an) > DACCS (10-300 Km³/an) > Biochar (0) (Smith 2016; Smith et al., 2016) (tableau 4.7). Si l'eau utilisée provenait des eaux fraîches, cela pourrait causer des effets négatifs sur la disponibilité de l'eau dans les territoires concernés. Suite à ces données, le risque de perturber l'approvisionnement en eau potable des populations locales serait élevé pour la BECCS, moyen pour le boisement/reboisement, faible pour la DACCS, et négligeable pour le biochar. De ce fait, le déploiement de la BECCS et le boisement/reboisement à grande échelle serait difficile à envisager dans les régions qui ont des contraintes de ressources hydriques. À long terme, ces deux approches pourraient aggraver la pression sur la demande en eau dans le contexte d'un développement démographique et économique croissant. Un pointage de -3 est attribué à ces deux technologies de BECCS et de boisement/reboisement. Une note de -1 est donnée pour la DACCS. Par contre, le biochar a une cotation de 0 pour ce critère (tableau 4.9).

4.8.4 Protection contre les catastrophes naturelles

Le déploiement du boisement/reboisement pourrait avoir un effet bénéfique sur la prévention de certaines catastrophes naturelles dans des régions données. Par exemple, il pourrait diminuer la fréquence et les dégâts des inondations qui ont tendance à augmenter avec les impacts des CC, et en particulier dans la période printanière lors de la fonte des neiges ou lors de pluies intenses. En ce sens, les arbres, par leurs racines, pourraient stabiliser les sols et freiner la vitesse des eaux de ruissellement, et donc l'érosion des sols (Livesley, McPherson et Calfapietra, 2016). Les racines des arbres accélèrent aussi l'infiltration des eaux pluviales dans les couches profondes des sols ce qui permettrait de baisser le risque des inondations. Les forêts pourraient également jouer un rôle clé dans la prévention de la sécheresse, car la capacité de stockage et de filtration d'eau des sols forestiers pourrait retenir l'eau et la libérer en cas de sécheresse. (Paquet, 2015)

Pour ces raisons une cotation de 3 est accordée au boisement/reboisement. Par contre, les autres technologies de DACCS, BECCS et le biochar ne semblent pas avoir un effet positif bien distingué sur la prévention contre les catastrophes naturelles (tableau 4,9).

4.9 Résultats de la dimension économique

Les résultats de la comparaison des technologies retenues selon les critères économiques sont résumés dans le tableau 4.10. Ils montrent que la BECCS, le boisement/reboisement et le biochar présentent moins de contraintes économiques comparées à la DACCS. En effet, un résultat total de 10 et 6 et 16 est obtenu pour la BECCS, le boisement/reboisement et le biochar, respectivement. Alors que, la DACCS a un effet global négatif. Les justifications de ces résultats sont indiquées dans les paragraphes suivants.

Tableau 4.10 Résultats de la dimension économique. T1 : DACCS (retrait direct de CO₂ atmosphérique et son stockage); T2 : BECCS (bioénergie avec capture et stockage de carbone); T3 : AR (boisement/reboisement); T4 : biochar

Sphères et Critères	Pondération	Résultats non pondérés				Résultats pondérés			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Économie									
Abordabilité du coût (\$/t CO ₂ éliminé)	2	-1	2	3	2	-2	4	6	4
Faible consommation d'énergie lors du déploiement	2	-2	3	3	3	-4	6	6	6
Effet sur le prix des denrées alimentaires	2	0	-3	-3	0	0	-6	-6	0
Favoriser l'emploi d'énergie à moindre impact	2	0	3	0	3	0	6	0	6
Total économique :	8					-6	10	6	16

4.9.1 Abordabilité du coût de mise en œuvre

Le coût de mise en œuvre par tonne de CO₂ éliminé par la DACCS serait plus élevé par rapport aux trois autres technologies étudiées, et ce comme indiqué dans le tableau 4.3. En effet, le coût maximal de ces technologies en ordre décroissant (en \$ US/t CO₂) sont les suivants : DACCS (300), BECCS (200), biochar (120), boisement/reboisement (50) (Fuss et al., 2018). Similairement, le besoin en investissement estimé par Smith et al., (2016) serait en ordre décroissant comme ceci : DACCS >> BECCS >> boisement/reboisement. Par conséquent, actuellement, la DACCS est considérée comme peu abordable. La BECCS est moyennement abordable. Alors que, le boisement/reboisement aurait des coûts très abordables pour sa mise en œuvre. Ainsi, la cotation de -1, 2, 3 et 2 est donnée au DACCS, BECCS, boisement/reboisement, et biochar, respectivement (tableau 4.10). De ce fait, le boisement/reboisement serait plus abordable que les trois autres technologies étudiées. L'échelle suivante est utilisée pour cette évaluation.

- Une valeur inférieure à 100 \$ US/t CO₂ est considérée comme abordable à très abordable. Une note de 3 lui est attribuée.
- Une valeur comprise entre 100 et 200 \$ US/t CO₂ est jugée comme moyennement abordable. Une cotation de 2 lui est accordée.
- Une valeur supérieure à 200 \$ US/t CO₂ est estimée comme peu ou très peu abordable. Une cotation de -1 lui a été donnée.

4.9.2 Faible consommation d'énergie lors du déploiement

Le besoin en énergie de la DACCS a été évalué comme étant plus important par rapport aux trois autres technologies présentées au tableau 4.3, et ce sur la base des estimations effectuées par Smith et al., (2016) et Smith, (2016). De la sorte, leur besoin énergétique en ordre décroissant est tel que (en EJ) : DACCS (156), le boisement/reboisement (très faible), biochar (-14 à -36) et la BECCS (-170). À partir de ces valeurs, la consommation de l'énergie est donc élevée pour la DACCS. Elle est très faible, voire même négligeable, pour le boisement/reboisement. Toutefois, celle du biochar et de la BECCS serait négligeable, puisque ces deux technologies génèrent de l'énergie durant leur fonctionnement et compensent leur dépense énergétique initiale (Smith, 2016; Smith et al., 2016). Une note de -2 est donnée à la DACCS, car elle est énergivore. Alors que la BECCS, le boisement/reboisement et le biochar ont une cotation de 3 qui signifie un impact positif sur le critère de faible consommation d'énergie (tableau 4.10).

4.9.3 Effet sur le prix des denrées alimentaires

L'exploitation de grandes surfaces terrestres pour des utilisations autres que l'agriculture pourrait avoir une conséquence négative sur le prix des denrées alimentaires. Par conséquent, le déploiement de la DACCS et de biochar à grande échelle pourrait ne pas avoir un impact négatif sur le prix de nourriture, puisque leur

demande en terres est faible. De ce fait, une cotation de 0 est attribuée à la DACCS et le biochar (tableau 4.3; tableau 4.10). Toutefois, l'adoption de BECS et de boisement/reboisement à grande échelle nécessiterait une exploitation des terres de grande ampleur. Cela pourrait réduire la disponibilité des sols pour l'agriculture, ce qui augmenterait les prix des denrées alimentaires. Un tel effet a été mentionné par plusieurs études pour la technologie de bioénergie ou le boisement (Boysen et al., 2017; Fuss et al., 2018; Nemet, et al., 2018; Popp et al., 2011). Une cotation de -3 a été donc attribuée à ces deux dernières technologies (tableau 4.10).

4.9.4 Favoriser l'emploi d'énergie à moindre impact

La mise en œuvre de la BECCS et le biochar permettrait de générer de l'énergie qui pourrait être utilisée pour divers usages. En effet, ces deux technologies offrent la conversion de la biomasse et des résidus végétaux en énergie, et en combustibles qui serviront à combler une partie des besoins énergétiques de différents secteurs économiques de la société. Cette forme d'énergie représente une source d'énergie renouvelable, car elle provient de la biomasse et de résidus végétaux riches en carbone assimilé lors de la photosynthèse. À titre d'exemple, la bioénergie provenant de divers organismes vivants ou de leurs dérivés pourrait compenser environ 6 % de l'approvisionnement énergétique du Canada (Gouvernement de Canada, 2018). Pour toutes ces raisons, une cotation de 3 est accordée à la BECCS et le biochar (tableau 4.10).

5 RECOMMANDATIONS

À la lumière de l'analyse multicritère réalisée dans le chapitre quatre, les constatations suivantes sont soulevées. Les quatre technologies de DACS, de BECCS, de boisement/reboisement et de biochar se distinguent par leurs effets secondaires potentiels. Dans ce sens, le biochar a très peu d'effets négatifs. Son résultat global est positif, et il est le plus élevé. L'impact global de la DACCS est également positif, mais il est moins élevé que celui du biochar ce qui la place en deuxième position. De même, le boisement/reboisement a un impact total positif. Par contre, il est plus faible que celui du biochar et de la DACCS, ce qui le situe en troisième rang. Enfin, la BECCS se présente en dernière position, puisque son effet global est négatif (tableau 4.7). De ce fait, le biochar et la DACCS auraient peu de risque ou sont considérés comme des technologies bénignes. Par contre, la BECCS pourrait produire des perturbations notables des écosystèmes et de la biodiversité si déployée à grande échelle.

Les quatre technologies étudiées ont toutes un potentiel de retrait de CO₂ significatif. Ce dernier est relativement plus élevé pour la DACCS et la BECCS comparées au boisement/reboisement et au biochar. Certaines de ces technologies, comme le biochar et la DACCS, pourraient être utilisées conjointement ce qui permettrait d'augmenter le potentiel global de retrait du CO₂ atmosphérique. Par contre, certaines d'entre elles ne semblent pas être compatibles si déployées à grande échelle. Par exemple, le boisement/reboisement et la BECCS ne seraient pas compatibles si appliqués conjointement, car elles nécessiteraient toutes deux de vastes étendues terrestres pour avoir un effet bénéfique sur l'atténuation de GES. Toutefois, la DACCS peut être employée parallèlement au biochar, à la BECCS ou au boisement/reboisement. Le biochar peut être mis en œuvre conjointement avec la BECCS, mais à condition que celle-ci ne causerait pas une perturbation de l'effet de biochar lié à la séquestration de carbone dans le sol.

Dans le but d'utiliser la DACCS et le biochar comme approches complémentaires aux efforts de réduction des émissions de GES, les recommandations suivantes sont données. La BECCS et le boisement/reboisement sont également considérées comme mesures additionnelles à ces deux premières approches.

5.1 Recommandations quant à l'emploi potentiel du biochar

Cette approche suscite beaucoup d'intérêt au niveau international grâce à ses multiples bénéfices liés à la séquestration de carbone dans les sols, l'amélioration de la fertilité des terres, et la gestion des matières résiduelles. En effet, ces dernières pourraient être utilisées comme matières premières pour la formation du biochar. Elle génère en plus de l'énergie et du carburant. À cause de ces bénéfices et son faible risque environnemental, elle pourrait constituer une stratégie attractive pour l'atténuation des CC. De plus, la technologie de la pyrolyse est déjà initiée via des projets pilotes implantés dans plusieurs pays y compris ceux en voie développement (*International Biochar Initiative*, 2018).

Les terres enrichies par le biochar pourraient être exploitées pour diverses utilisations des sols ce qui représente un avantage par rapport aux trois autres technologies et en particulier la BECCS et le boisement/reboisement. Le biochar favorise la productivité des plantes, et pourrait ainsi améliorer les rendements agricoles tout en contribuant à la séquestration de carbone dans le sol. Néanmoins, avant sa mise en œuvre à grande échelle, des recherches supplémentaires et des essais détaillés devraient être conduits afin de bonifier les connaissances sur les sujets suivants :

- A. Évaluer l'effet du biochar sur l'albédo de la surface du sol lorsque ce produit sera déployé à grande échelle pour atténuer les CC. Dans ce sens, une diminution de l'albédo terrestre pourrait interférer avec son effet de séquestration du CO₂ atmosphérique. En effet, comme indiqué précédemment, étant donné que le biochar a une faible réflectivité son emploi sur de grandes surfaces terrestres pourrait avoir un effet sur le climat via le changement de l'albédo (Bozzi, Genesio, Toscano, Pieri et Miglietta, 2015). Très peu d'études ont été conduites pour analyser plus en détail cet impact du biochar sur l'albédo du sol en condition réelle.
- B. Étudier l'effet du biochar sur les gènes impliqués dans la tolérance des plantes aux différents stress environnementaux. En ce sens, les résultats d'une étude ont permis de constater que la stimulation de la croissance des plantes par le biochar pourrait s'accompagner par une légère diminution de l'expression de certains gènes impliqués dans la défense des plantes aux stress environnementaux (Viger, Hancock, Miglietta et Taylor, 2015). Cela suggère la nécessité de mener des études plus détaillées, en utilisant un gradient de concentrations de biochar pour déterminer si ce changement de la génétique des plantes pourrait affaiblir leur immunité face à un stress environnemental donné.
- C. Estimer la disponibilité de matières premières à l'échelle planétaire pour la production de biochar. Cette estimation permettrait d'établir le potentiel de chaque région à fournir de telles matières afin de prédire la possibilité de développer un marché éventuel de ces résidus dans certains pays.
- D. Évaluer les effets à long terme du biochar sur l'environnement, car de telles informations sont peu connues.
- E. Enfin, un autre sujet important qui mérite d'être investigué concerne les interactions du biochar avec les herbicides ou les pesticides utilisés en agriculture. Ces renseignements serviront d'optimiser l'exploitation des terres amendées par le biochar pour les activités agricoles tout en contribuant au stockage de carbone dans les sols.

5.2 Recommandations quant à l'emploi de la capture directe de CO₂ et son stockage

Plusieurs chercheurs ont souligné que la DACCS constituerait une des solutions les plus prometteuses pour l'atténuation du réchauffement planétaire. Cela est dû à son efficacité démontrée via des projets de retrait de CO₂ sur le terrain grâce aux premières usines pilotes (EASAC, 2018). Cette approche nécessite peu de

surfaces terrestres pour sa mise en œuvre. Elle pourrait même être installée sur des terres non fertiles ce qui constitue un avantage par rapport aux autres technologies de BECCS et de boisement/reboisement. Mais, le déploiement actuel à grande échelle de la DACCS est limité par sa consommation énergétique élevée, ainsi que par le risque potentiel lié à la sécurité des réservoirs de stockage de CO₂. Afin d'encourager son emploi à grande échelle, les recommandations suivantes sont à considérer.

- A. Utiliser une source d'énergie renouvelable à faible coût pour diminuer les dépenses énergétiques de la DACCS. Cet objectif pourrait être atteint par l'usage des sources d'énergies propres comme l'énergie éolienne, solaire ou hydrolienne. Ainsi, la disponibilité de l'énergie hydrolienne au Québec sera très favorable au déploiement de la DACCS sur le territoire québécois. Similairement, Breyer et al., (2018) ont proposé d'installer les équipements de la DACCS dans les régions qui ont un fort potentiel de produire l'énergie via le vent et l'énergie solaire comme le Maghreb. Ils estiment que la DACCS serait viable, et que son coût diminuera de manière importante au cours des prochaines années grâce à l'usage de l'énergie renouvelable et les progrès technologiques prévus. Selon ces mêmes auteurs, si l'énergie photovoltaïque est utilisée, le coût de la DACCS pourrait être réduit à environ : 120 à 63 \$ US par tonne de CO₂ éliminé de l'atmosphère en 2030 et 2050, respectivement.
- B. Promouvoir des projets de recherche sur le stockage de CO₂ capté sous une forme sécuritaire pour minimiser le risque de sa libération dans l'environnement, car un tel incident pourrait nuire et retarder les efforts d'atténuation de GES. Pour cela, plusieurs chercheurs ont proposé de stocker le CO₂ capté sous une forme solide de minéraux carbonatés (Breyer et al., 2018; Naraharisetty, Yeo et Bu, 2019).
- C. Favoriser la réutilisation industrielle du CO₂ capté. Dans ce sens, plusieurs applications pour réutiliser ce gaz sont possibles. Par exemple, le CO₂ peut être utilisé comme matière première pour plusieurs industries comme l'industrie de breuvage et alimentaire (*Global Carbon Capture and Storage Institute* [GCCSI], s. d.). De même, le CO₂ peut être employé dans l'industrie chimique pour la fabrication de différents composés comme l'urée et le méthanol, ainsi que l'industrie pharmaceutique et l'industrie des polymères. La conversion du CO₂ en carburants est une autre voie intéressante pour la valorisation de ce gaz. Le méthane, le méthanol et les alcanes sont des exemples de produits qui peuvent être fabriqués en utilisant le CO₂ capturé en tant que matière première. Le carburant formé peut être utilisé dans divers secteurs, notamment les piles à combustible, les centrales électriques et le transport. (Al-Mamoori, 2017) Au Québec, la technologie de la compagnie de *CO₂ Solutions* permet de capter le CO₂ directement à la sortie des cheminées des grandes industries émettrices de GES. Elle offre donc à celles-ci la possibilité d'avoir leur propre installation de captation de CO₂ dans le but de le réutiliser dans leur procédé industriel ce qui leur permet de réduire les coûts de leurs intrants. Ces grands émetteurs de GES pourraient

aussi vendre le CO₂ capté à une autre entreprise située à leur proximité. Ce processus leur permet de réduire leur empreinte environnementale tout en générant des revenus supplémentaires. (*CO₂ Solution*, 2018)

- D. Évaluer les sites ou les régions potentiels qui sont favorables à l'application de la DACCS. Ces régions devraient avoir un potentiel d'offrir de l'énergie éolienne et solaire requise pour le fonctionnement de la DACCS. Par exemple, Psarras et al., (2017) ont présenté une carte de déploiement de la DACCS pour les États-Unis en considérant les sites potentiels de stockage du CO₂, et la disponibilité de l'énergie solaire ou éolienne. Mais, une carte globale de déploiement potentiel serait pertinente à établir.

5.3 Recommandations quant à l'emploi potentiel du boisement/reboisement

En plus de son potentiel de séquestration du CO₂ atmosphérique, le boisement/reboisement, appliqué à petite échelle, offre des avantages au niveau de la préservation de la biodiversité locale, la prévention de la déforestation et des catastrophes naturelles. De plus, il représente une stratégie d'atténuation du GES à faible coût comparé aux trois autres technologies étudiées. Toutefois, il nécessiterait beaucoup de surfaces terrestres pour produire un effet significatif sur l'atténuation des CC. Lorsqu'il est appliqué à grande échelle, il pourrait avoir des effets secondaires négatifs liés à la compétition avec les différentes utilisations des sols, les changements d'usage des terres, la consommation d'eau, et la modification de l'albédo des sols dans certaines régions. Pour toutes ces raisons, des résultats faibles ont été obtenus au niveau de la sphère environnementale et sociale. Les recommandations principales pour l'emploi de cette technologie sont les suivantes :

- A. Mener des études plus détaillées concernant les espèces d'arbres naturelles qui pourraient être employées sans avoir un effet significatif sur la diminution de l'albédo des surfaces terrestres.
- B. Déterminer de façon générale la modification de l'albédo terrestre lors d'un déploiement du boisement/reboisement à grande échelle. Cela permettrait de connaître si ce changement de l'albédo pourrait contrecarrer l'effet bénéfique de séquestration du CO₂ par les arbres.
- C. Déterminer les régions qui sont favorables à l'implantation de cette approche au niveau planétaire. Ces régions devraient avoir des sols et des conditions climatiques convenables pour assurer une bonne productivité des arbres sans avoir recours à l'emploi des fertilisants.

5.4 Recommandations quant à l'emploi potentiel de la BECCS

La présente analyse a montré que la BECCS pourrait avoir plusieurs impacts négatifs sur les aspects environnementaux et sociaux. Ces effets sont expliqués par le fait que cette technologie nécessiterait de grandes étendues terrestres pour la croissance des plantes. Cela pourrait induire à long terme une

dégradation de la biodiversité et des écosystèmes. De même, elle pourrait entrer en conflit avec la production alimentaire si des terres fertiles sont exploitées pour la production de la biomasse végétale. Elle affecterait négativement la quantité des eaux fraîches si l'eau des cours d'eau naturels est utilisée pour l'irrigation des plantes. Ces facteurs influencent négativement l'acceptabilité sociale de cette technologie. Dans ce sens, pour être acceptable sur le plan environnemental et social, la biomasse végétale devrait être obtenue de manière respectueuse de l'environnement, des ressources naturelles, et donc de la capacité de support des écosystèmes.

Par contre, la BECCS a un impact positif au niveau économique, car elle pourrait générer de l'énergie et contribue ainsi à diminuer l'utilisation de l'énergie fossile. Elle a également un potentiel de séquestration de CO₂ relativement élevé qui est comparable à celui de la DACCS. Les recommandations principales concernant l'utilisation de cette approche pour l'atténuation des GES sont les suivantes.

- A. Limiter la conversion des terres ou des habitats naturels pour la production de la biomasse végétale. Cet objectif pourrait être atteint selon plusieurs stratégies. Par exemple, l'emploi de biochar dans les sols fournirait des éléments nutritifs pour augmenter la croissance des plantes cultivées. Ainsi, moins de terres seront utilisées pour générer la biomasse végétale. Cela pourrait donc réduire la consommation d'eau, l'emploi de fertilisants, et les effets négatifs sur la biodiversité et l'agriculture. Par contre, il faudrait s'assurer que la récolte de la biomasse végétale ne causerait pas une perturbation du stockage de carbone dans les sols qui provient de l'emploi du biochar. Si c'est le cas, le biochar et la BECCS ne devraient pas être utilisés sur les mêmes terrains. Une autre possibilité serait d'employer la biomasse des algues, car ces organismes ont une grande productivité de biomasse et de protéines qui est plus élevée que celles des autres végétaux terrestres. De cette façon, peu de surface terrestre serait utilisée ce qui a pour effet de préserver la biodiversité et la sécurité alimentaire. L'usage des algues comme matière première pour la BECCS peut ainsi favoriser le développement et le déploiement de cette approche dans l'avenir.
- B. Pour minimiser l'impact de la BECCS sur la quantité des eaux utilisées pour l'irrigation des plantes, des eaux usées pourraient être considérées à cette fin.
- C. Pour diminuer les inconvénients liés aux stockages du CO₂, les mêmes recommandations indiquées pour la DACCS seraient aussi valables pour la BECCS.

CONCLUSION

Dans le contexte des changements climatiques, l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre représente un objectif urgent à réaliser pour stabiliser la température planétaire à un niveau sécuritaire pour l'humanité et la biodiversité. Dans ce but, les mesures menées par plusieurs pays seraient insuffisantes pour respecter les recommandations de l'accord de Paris. La géo-ingénierie est perçue par certains scientifiques comme un outil potentiel pour diminuer le réchauffement de la Terre. Mais, cette approche demeure controversée en raison de ses enjeux environnementaux, sociaux et éthiques. L'objectif de cet essai a été donc d'évaluer l'état d'avancement, le potentiel d'atténuation des changements climatiques et les effets secondaires de certaines technologies de géo-ingénierie lorsqu'elles sont utilisées à grande échelle. Ces dernières pourraient ainsi être déployées comme outil complémentaire aux efforts d'atténuation de gaz à effet de serre. Dans ce sens, une analyse multicritère est effectuée en utilisant certains critères choisis sur la base de leurs importances vis-à-vis de l'atténuation des gaz à effet de serre, et des enjeux environnementaux, économiques et sociaux. En considérant certains indices, comme le contrôle temporel et la maturité de ces technologies, quatre approches sont retenues pour réaliser cette analyse : la capture directe du dioxyde de carbone, la bioénergie, le boisement/reboisement et le biochar. À la lumière des données de la littérature la plus récente, l'évaluation comparative de ces technologies a été menée.

Les résultats ont montré que le biochar se situe en première position, car il présente un effet global positif le plus élevé. Le biochar est un charbon riche en carbone créé par pyrolyse d'une variété de résidus de biomasse végétale, et qui peut séquestrer le carbone dans le sol pendant une très longue période. Son emploi à grande échelle serait dépendant de l'approvisionnement durable de matières premières utilisées pour produire ce composé. La technologie de la capture directe du dioxyde de carbone se place en deuxième rang après le biochar, et constitue une mesure intéressante à cause de son potentiel de séquestration du dioxyde de carbone relativement plus important comparé au biochar. Elle ne semble pas être dépendante de grandes surfaces terrestres ni de matières premières pour son déploiement. Mais, elle serait énergivore et nécessiterait donc l'emploi d'une énergie renouvelable pour favoriser son adoption. Le développement d'une industrie pour la réutilisation du dioxyde de carbone capté serait avantageux pour diminuer sa dépendance à la capacité du stockage de ce gaz dans les réservoirs géologiques. Le boisement/reboisement se situe en troisième position après le biochar. Il offre une possibilité de retrait du dioxyde de carbone à faible coût comparé aux trois autres approches étudiées. Son besoin énergétique est négligeable. Il a également des bénéfices environnementaux et sociaux comme la lutte contre la déforestation. Toutefois, il nécessiterait de grandes surfaces terrestres pour contribuer à l'atténuation du réchauffement climatique. De plus, lorsque déployé à grande échelle, il pourrait avoir des conséquences défavorables sur la biodiversité via le changement d'usage des terres. La bioénergie se place en quatrième position. Elle a un effet positif au niveau économique comme le biochar, car elle génère de l'énergie. Par contre, elle a un résultat global négatif à cause de ses impacts négatifs sociaux et environnementaux. En

effet, elle nécessiterait de grandes surfaces terrestres, une consommation d'eau, et l'emploi potentiel de fertilisants pour la croissance des plantes. Ainsi, la bioénergie pourrait induire à long terme une altération de la biodiversité et entrer en conflit avec l'agriculture. Toutefois, ses impacts négatifs pourraient être réduits via différentes stratégies. Par exemple, la culture des algues, qui ont une productivité importante, offre la possibilité de produire la biomasse tout en évitant les conflits d'utilisation des terres. Une autre limitation rapportée pour la bioénergie et le boisement/reboisement est leur vulnérabilité aux incendies, aux maladies et ravageurs, et aux modifications des politiques forestières.

En résumé, les technologies de capture directe du dioxyde carbone, la bioénergie, le boisement/reboisement et le biochar, offrent toutes un certain potentiel de séquestration du dioxyde de carbone atmosphérique. Elles pourraient contribuer en partie à réduire le réchauffement planétaire. Les deux technologies de biochar et de la capture directe du dioxyde de carbone comportent peu ou pas de risques environnementaux comparés à la bioénergie et le reboisement/boisement. Elles pourraient être explorées pour compléter les efforts d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, mais elles ne devraient pas être considérées comme un programme de remplacement à ces efforts.

De façon générale, la géo-ingénierie ne constitue qu'une solution parmi d'autres stratégies potentielles pour contrer les changements climatiques. Elle ne constitue qu'un remède non testé à grande échelle, et dont les impacts réels et secondaires demeurent encore peu connus. Elle suscite certains espoirs pour contrer les changements climatiques, mais beaucoup de critiques et de risques. Notamment, elle pourrait inciter les gens à continuer de consommer les énergies fossiles et à produire plus de gaz à effet de serre, au lieu de se diriger vers un avenir sobre en carbone. Ainsi, les mesures déployées par les gouvernements et les institutions pour atténuer le réchauffement planétaire doivent cibler principalement la réduction des gaz à effet de serre, et ce à la source de leurs émissions. Cela ne peut se faire que par un changement continu du comportement des individus, de l'économie et des méthodes de production et de consommation des biens pour émettre moins de carbone.

RÉFÉRENCES

- Ahmed, A., Kurian, J. et Raghavan, V. (2016). Biochar influences on agricultural soils, crop production, and the environment: A review. *Environmental Reviews*, 24(4), 495-502.
- Akbari, H., Menon, S. et Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*, 94(3-4), 275-286.
- Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A. et Rezaei, F. (2017). Carbon capture and utilization uptake. *Energy Technology*, 5(6), 834-849.
- Alterskjær, K., Kristjánsson, J. E., Boucher, O., Muri, H., Niemeier, U., Schmidt, H.,...Timmreck, C. (2013). Sea-salt injections into the low-latitude marine boundary layer: The transient response in three Earth system models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(21), 195-206.
- Alves, P. L., Formiga, K. T. M. et Traldi, M. A. B. (2018). Rainfall interception capacity of tree species used in urban afforestation. *Urban Ecosystems, Salzburg*, 21(4), 697-706.
- Atelier : analyse multicritère*. (2016). Cours d'élément de gestion de l'environnement (ENV 790). Centre universitaire de formation en environnement et développement durable (CUFE). Université de Sherbrooke. 23pp.
- Aziz, A., Hailes, H. C., Ward, J. M. et Evans, J. R. G. (2014). Long-term stabilization of reflective foams in sea water. *The Royal Society of Chemistry Advance*, 95(4), 53028-53036.
- Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T. J., Lobell, D. B., Delire, C. et Mirin, A. (2007). Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(16), 6550-6555.
- Barkakaty, B., Sumpter, B. G., Ivanov, I. N., Potter, M. E., Jones, C. W. et Lokitz, B. S. (2017). Emerging materials for lowering atmospheric carbon. *Environmental Technology and Innovation*, 7(C), 30-43.
- Barrett, S. (2008). The incredible economics of geoengineering. *Environmental and Resource Economics*, 39(1), 45-54.
- Baughman, E., Gnanadesikan, A., Degaetano, A. et Adcroft, A. (2012). Investigation of the surface and circulation impacts of cloud-brightening geoengineering. *Journal of Climate*, 25(21), 7527-7543.
- Beal, C. M., Archibald, I., Huntley, M. E., Greene, C. H. et Johnson, Z. I. (2018). Integrating Algae with Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS) Increases Sustainability. *Earth's Future*, 6(3), 524-542.
- Bellamy, R., Lezaun, J. et Palmer, J. (2017). Public perceptions of geoengineering research governance: An experimental deliberative approach. *Global Environmental Change*, 45, 194-202.
- Benedick, R. E. (2011). Considerations on Governance for Climate Remediation Technologies: Lessons from the Ozone Hole. *Stanford Journal of Law, Science and Policy*, 4(1), 6-9.
- Bodansky, D. (2013). The who, what, and wherefore of geoengineering governance. *Climatic Change*, 121(3), 539-551.
- Bony, S. et Dufresne, J. L. (2007). Processus régissant la sensibilité climatique. *La Météorologie. Revue de l'atmosphère et du climat*, 56, 29-32. Repéré à <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/18165>

- Boucher, O., Guillebon, B., Abbadie, L., Barré, P., Bekki, S., Bensaude-Vincent, B.,...Vidalenc, E. (2014). *Atelier de réflexion prospective réagir : réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement*. Repéré à <http://minh.haduong.com/files/Boucher.ea-2014-RapportFinalREAGIR.pdf>
- Bourg, D. et Hess, G. (2010). La géo-ingénierie : réduction, adaptation et scénario du désespoir. EDP Sciences. *Natures Sciences Sociétés*, 18, 298-304.
- Bower, K., Choularton, T., Latham, J., Sahraei, J. et Salter, S. (2006). Computational assessment of a proposed technique for global warming mitigation via albedo-enhancement of marine stratocumulus clouds. *Atmospheric Research*, 82(1-2), 328-336.
- Boysen, L. R., Lucht, W. et Gerten, D. (2017). Trade-offs for food production, nature conservation and climate limit the terrestrial carbon dioxide removal potential. *Global Change Biology*, 23(10), 4303-4317.
- Brassard, P., Godbout, S. et Raghavan, V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management*, 181(1), 484-497.
- Braun, C. (2017). Not in My Backyard: CCS Sites and Public Perception of CCS. *Risk Analysis*, 37(12), 2264-2275.
- Braun, C., Merk, C., Pönitzsch, G., Rehdanz, K. et Schmidt, U. (2018). Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany: Survey evidence. *Climate Policy*, 18(4), 471-484.
- Breyer, C., Fasihi, M. et Aghahosseini, A. (2018, mai). *CO₂ direct air capture for effective climate change mitigation: A new type of energy system sector coupling*. Communication présentée au International Conference on Negative CO₂ Emissions, Gothenburg, Sweden. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/325314495_CO₂_Direct_Air_Capture_for_effective_Climate_Change_Mitigation_A_new_Type_of_Energy_System_Sector_Coupling](https://www.researchgate.net/publication/325314495_CO2_Direct_Air_Capture_for_effective_Climate_Change_Mitigation_A_new_Type_of_Energy_System_Sector_Coupling)
- Brilli, F., Giolo, B., Fares, S., Terenzio, Z., Zona, D., Gielen, B.,...Ceulemans, R. (2016). Rapid leaf development drives the seasonal pattern of volatile organic compound (VOC) fluxes in a coppiced bioenergy poplar plantation. *Plant, Cell and Environment*, 39(3), 539-555.
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S.,...Dowell, N. M. (2018). Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy and Environmental Science*, 11(5), 1062-1176.
- Burns, W. et Nicholson, S. (2017). Bioenergy and carbon capture with storage (BECCS): The prospects and challenges of an emerging climate policy response. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 7(4), 527-534.
- Caldeira, K., Bala, G. et Cao, L. (2013). The science of geoengineering. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1), 231-56.
- Carr, W. A. et Yung, L. (2018). Perceptions of climate engineering in the South Pacific, Sub-Saharan Africa and North American Arctic. *Climatic Change*, 147(1-2), 119-132.
- Carrer, D., Pique, G., Ferlicq, M., Ceamanos, X. et Ceschia, E. (2018). What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming?: A case study based on the use of cover crops. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044030.

- Castaldo, V. L., Pisello, A. L., Piselli, C., Fabiani, C., Cotana, F. et Santamouris, M. (2018). How outdoor microclimate mitigation affects building thermal-energy performance: A new design-stage method for energy saving in residential near-zero energy settlements in Italy. *Renewable Energy*, 127(C), 920-935.
- CO₂ Solution. (2018). Application : un avenir riche pour la réutilisation du CO₂. Repéré à <https://co2solutions.com/reutilisation/>
- Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies [COMEST]. (2010). *Les implications éthiques du changement climatique mondial. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture*. Repéré à <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001881/188198f.pdf>
- Convention de Londres. (2008). Resolution LC-LP.1 on the regulation of ocean fertilization. Repéré à <http://www.who.edu/files/server.do?id=56339&pt=10&p=39373>
- Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM). (1994). *United Nations Convention on the Law of the Sea*. Repéré à http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_f.pdf
- Convention sur la Diversité Biologique (CDB) (2010a). *Décision adoptée par la conférence des parties à la convention sur la diversité biologique à sa dixième réunion. COP 10*. Repéré à https://treaties.un.org/doc/source/docs/UNEP_CBD_COP_DEC_X_1-F.pdf
- Convention sur la Diversité Biologique (CDB). (2010b). Climate-related Geoengineering and Biodiversity: Technical and Regulatory Matters on Geoengineering in relation to the CBD. Repéré à <http://www.cbd.int/climate/geoengineering>
- Convention-Cadre des Nations unies sur les changements climatiques [CCNUCC]. (1992). *Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques*. Repéré à <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>
- Corner, A. et Pidgeon, N. (2015). Like artificial trees? The effect of framing by natural analogy on public perceptions of geoengineering. *Climatic Change*, 130(3), 425-438.
- Corner, A., Pidgeon, N. et Parkhill, K. (2012). Perceptions of geoengineering: Public attitudes, stakeholder perspectives, and the challenge of upstream engagement. *WIREs Climate Change*, 3(5), 451-466.
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndt, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F.,...Masera, O. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. *Global Change Biology Bioenergy*, 7(5), 916-944.
- Crook J. A., Jackson, L. S., Osprey, S. M. et Forster, P. M. (2015). A comparison of temperature and precipitation response to different Earth radiation management geoengineering schemes. *Journal Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18), 9352-9373.
- Crutzen, P. J. (2006). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77(3), 211-219.
- Cvijanovic, I., Caldeira, K. et MacMartin, D. G. (2015). Impacts of ocean albedo alteration on Arctic sea ice restoration and Northern Hemisphere climate. *Environmental Research Letters*, 10(4), 044020.
- Daley, J. (2017). First Commercial Carbon-Capture Plant Goes Online. Repéré à <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/first-commercial-carbon-capture-plant-goes-online-180963526/>

- Davies-Barnard, T. (2014). Cooling the Earth with crops. Dans R. E. Hester et R. M. Harrison (dir.), *Geoengineering of the Climate System: Issues in environmental science and technology*, 38 (p. 105-130). Cambridge, Royaume-Uni: The Royal Society of Chemistry Repéré à <http://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/RobockStratAerosolGeo.pdf>
- Desjardins, J. (2018). Le biocharbon fait une percée au Québec. La Terre De Chez Nous. Repéré à <https://www.laterre.ca/utiliterre/nouveautes/biocharbon-percee-quebec>
- Dilling, L. et Hauser, R. (2013). Governing geoengineering research: Why, when and how? *Climatic Change*, 121(3), 553-565.
- Edwards, D. P., Lim, F., James, R. H., Pearce, C. R., Scholes, J., Freckleton, R. P. et Beerling, D. J. (2017). Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. *Biology Letters*, 13(4), 0715.
- Ellison, D., Morris C. E., Locatellie, B., Sheilg, D., Cohenh, J., Murdiyarsoi, D.,...Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51-61.
- Environmental Modification Convention (ENMOD). (1977). Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques. Repéré à <http://un-documents.net/enmod.htm>
- Environnement et Changement climatique Canada. (ECCC). (2018a). *Rapport d'inventaire national 1990-2016 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Sommaire*. Repéré à <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/emissions-inventories-reporting/nir-executive-summary/Rapport%20Inventaire%20National%20Sommaire%202018.pdf>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2018b). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : émissions de gaz à effet de serre*. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/En4-144-14-2018-fra.pdf
- European Academies Science Advisory Council (EASAC). (2018). *Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?* Repéré à https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf
- Ferraro, A. J. et Griffiths, H. G. (2016). Quantifying the temperature-independent effect of stratospheric aerosol geoengineering on global-mean precipitation in a multimodel ensemble. *Environmental Research Letters*, 11(3), 34012.
- Fuss, S., Jones, C. D., Kraxmer, F., Peters, G. P., Smith, P., Tavoni, M.,...Yamagata, Y. (2016). Research priorities for negative emissions. *Environmental Research Letters*, 11(11), 115007. Repéré à <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/11/115007/meta>
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T.,...Minx, J. C. (2018). Negative emissions-Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002.
- Gabriel, C. J., Robock, A., Xia, L., Zambri, B. et Kravitz, B. (2017). The G4Foam Experiment: Global climate impacts of regional ocean albedo modification. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(1), 595-613.
- Geoengineering Monitor. (2018). *Geoengineering briefing: Marine cloud brightening project*. Repéré à http://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2018/04/geoeng_briefing-MCBP.pdf

- Geoengineering Monitor. (s. d.). Reasons to Oppose Geoengineering. Repéré à <http://www.geoengineeringmonitor.org/reasons-to-oppose/>
- George, C., Kohler, J. et Rillig, M. C. (2016). Biochar reduce infection rates of the root-lesion nematode *Pratylenchus penetrans* and associated biomass loss in carrot. *Soil Biology and Biochemistry*, 95, 11-18.
- Global Carbon Capture and Storage Institute (GCCSI). (s. d.). Projects Database: CO₂ utilisation. Global CCS Institute. Repéré à <https://www.globalccsinstitute.com/projects/co2-utilisation-projects>
- Gough, C et Upham, P. (2011). Biomass energy with carbon capture and storage (BECCS or Bio-CCS). *Greenhouse Gas Science Technology*, 1, 324-334.
- Gouvernement du Canada. (2016a). Mesures internationales du Canada sur les changements climatiques : l'Accord de Paris. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/accord-paris.html>
- Gouvernement du Canada. (2016b). *Deuxième rapport biennal du Canada sur les changements climatiques*. Repéré à https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/ges-ghg/02d095cb-bab0-40d6-b7f0-828145249af5/3001-20unfccc-202nd-20biennial-20report_f_v7_lowres.pdf
- Gouvernement du Canada. (2016c). *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques*. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2017/eccc/En4-294-2016-fra.pdf
- Gouvernement du Canada. (2018). Systèmes de bioénergie. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable-electricite/systemes-bioenergie/7312>
- Gouvernement du Québec. (2018). *Changements climatiques : des actions pour la réduction des GES. Budget 2018-2019*. Repéré à http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2018-2019/fr/documents/ChangementsClimatiques_1819.pdf
- Grandey B. S. et Wang, C. (2015). Enhanced marine sulphur emissions offset global warming and impact rainfall. *Scientific Reports*, 5, 13055.
- Grannec, F. et Litt, M. (s. d.). *Discussion sur le documentaire l'arnaque du réchauffement climatique : rayons cosmiques, nuages et interactions avec le climat*. Observatoire des sciences de l'univers de Grenoble. Université Joseph Fourier. Repéré à <http://www.lthe.fr/IGE/pageperso/parrenif/courses/download/2008-2009/paleoclimats/Grannec-Litt.pdf>
- Greene, C. H., Huntley, M. E., Archibald, I., Gerber, L. N., Sills, D. L., Granados, J.,...Walsh, M. J. (2017). Geoengineering, marine microalgae, and climate stabilization in the 21st century. *Earth's Future*, 5(3), 278-284.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2013). *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs*. Repéré à https://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014a). *Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse*. Repéré à https://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (GIEC). (2014b). *Changements climatiques 2014 : incidences, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs*. Repéré à https://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2018a). *Chapter 4: Strengthening and implementing the global response: Special reports*. Lead Authors: De Coninck, H. et Revi, A. Repéré à http://ipcc.ch/pdf/special-reports/sr15/sr15_chapter4.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2018b). *Global Warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Summary for Policymakers. Repéré à http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf
- Guo, A., Moore, J. C. et Ji, D. (2018). Tropical atmospheric circulation response to the G1 sunshade geoengineering radiative forcing experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 8689-8706.
- Gupta, H. (2016). Geoengineering: Issues and Perspectives. *Environmental Policy and Law*, 46(1), 50-55.
- Hamwey, R. M. (2007). Active Amplification of the Terrestrial Albedo to Mitigate Climate Change: An exploratory study. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(4), 419-439.
- Hartmann, J., West, J., Renforth, P., Köhler, P., De La Rocha, C., Wolf-Gladrow, D. A.,...Scheffran, J. (2013). Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients and mitigate ocean acidification. *Reviews of Geophysics*, 51(2), 113-149.
- Hartmann, J., Moosdorf, N., Laurwald, R., Hinderer, M. et West, A. J. (2014). Global chemical weathering and associated P-release: The role of lithology, temperature and soil properties. *Chemical Geology*, 363, 145-163.
- He, J. et Zheng, F. (2017). Structural feasibility and orbital stability of a proposed huge space shield for mitigating global warming. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(10), 1-8.
- Heck, V., Gerten, D., Lucht, W. et Popp, A. (2018). Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature Climate Change, London*, 8(2), 151-155.
- Heckendorn, P., Weisenstein, D., Fueglistaler, P., Luo, B. P., Rozanov, E., Schraner, M.,...Peter, T. (2009). The impact of geoengineering aerosols on stratospheric temperature and ozone. *Environmental Research Letters*, 4(4), 45108.
- Hickman, J. (2018). The political economy of a planetary sunshade. *Astropolitics*. 16(1), 49-58.
- Hirsch, A., Wilhelm, M., Davin, E. L., Thiery, W. et Seneviratne, S. I. (2017). Can climate-effective land management reduce regional warming? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(4), 2269-2288.
- Horton, J. B. et Reynolds, J. L. (2016). The international politics of climate engineering: A review and prospectus for international relations. *International Studies Review*, 18(3), 438-461.
- Huang, W. K., Ji, H. L., Gheysen, G., Debode, J. et Kyndt, T. (2015). Biochar-amended potting medium reduces the susceptibility of rice to root-knot nematode infections. *BMC Plant Biology*, 15(1), 267.
- Huisingh, D., Zhang, Z., Moore, J. C., Qiao, Q., et Li, Q. (2015). Recent advances in carbon emissions reduction: Policies, technologies monitoring, assessment and modeling. *Journal of Cleaner Production*, 103, 1-12.

- Husk, B., et Major, J. (s. d.). *Le biochar comme amendement du sol au Québec : résultats agronomiques de quatre ans d'essais terrain*. Repéré à <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Major.pdf>
- Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S.,...Siddique K. H. M. (2017). Biochar for crop production: potential benefits and risks. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3), 685-716.
- International Biochar Initiative (IBI). (2018). Biochar work in developing countries: The 9 country projects. Repéré à <https://biochar-international.org/9country/>
- Ipsos-MORI. (2010). Experiment Earth? Report on a Public Dialogue on Geoengineering. Swindon: Natural Environment Research Council. Repéré à <https://nerc.ukri.org/about/whatwedo/engage/engagement/geoengineering/geoengineering-dialogue-final-report/>
- Irvine, P. et Ridgwell, A. (2009). Geoengineering: taking control of our planet's climate. *Science Progress*, 92(2), 139-162.
- Irvine, P. J., Ridgwell, A. et Lunt, D. J. (2011). Climatic effects of surface albedo geoengineering. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(D24), D24112.
- Irvine, P. J., Kravitz, B., Lawrence, M. G et Muri, H. (2016). An overview of the earth system science of solar geoengineering. *Climate Change*, 7(6), 815-833.
- Ito, A. (2018). Solar radiation management and ecosystem functional responses. *Climatic Change*, 142(1-2), 53-66.
- Izrael, Y. A., Volodin, E. M., Kostykin, S. V., Revokatova, A. P. et Ryaboshpko. A. G. (2013). Possibility of geoengineering stabilization of global temperature in the 21st century using the stratospheric aerosol and estimation of potential negative effects. *Russian Meteorology and Hydrology*, 38(6), 371-381.
- Jiang, J., Zhang, H., et Cao, L. (2018). Simulated effect of sunshade solar geoengineering on the global carbon cycle. *Science China Earth Sciences*, 61(9), 1306-1315.
- Jin, Z., Charlock, T. P., Smith, J. R. W. L. et Rutledge, K. (2004). A parameterization of ocean surface albedo. *Geophysical Research Letters*, 31(22), L22301.
- Jones, A., Haywood, J. et Boucher, O. (2009). Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds. *Journal of Geophysical Research*, 114(D10), D10106.
- Keith, D. W., Holmes, G., St Angelo, D., et Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573-1594.
- Kim, G. S., Lim, C. H., Kim, S. J., Lee, J., Son, Y. et Lee, W. K. (2018). Effect of national-scale afforestation on forest water supply and soil loss in South Korea, 1971-2010. *Sustainability*, 9(6), 1017.
- Kleinschmitt, C., Boucher, O., et Platt, U. (2018). Sensitivity of the radiative forcing by stratospheric sulfur geoengineering to the amount and strategy of the SO₂ injection studied with the LMDZ-S3A model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(4), 2769-2786.

- Kraxner, F., Nordström E. A., Havlik, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S.,...Obersteiner, M. (2013). Global bioenergy scenarios e Future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and bioenergy*, 57, 86-96.
- Kunzig, R. (2008). A sunshade for planet earth. *Scientific American*, 299(5), 46-55.
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., et Naidub, R. (2016). Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. *Environment International*, 87, 1-12.
- Kyriakodis, G. E. et Santamouris, M. (2018). Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates: Results from a large-scale urban. *Urban Climate*, 24, 326-339.
- Lawrence, M. K., Schafer, S., Muri, H., Scott, V., Oshlies, A., Vaughan, N. A.,...Scheffran, J. (2018). Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature communications*, 9(1), 3437.
- Leal-Arcas, R. et Filis-Yelaghotis, A. (2012). Geoengineering a Future for Humankind: Some Technical and Ethical Considerations. *Carbon and Climate Law Review*, 6(2), 128-148.
- Lemmen, D. S., Warren, F. J., James, T. S. et Mercer Clarke, C. S. L. (2016). *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat. Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario)*. Repéré à https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2016/Coastal_Assessment_Rapport_complet.pdf
- Lenferna, G. A., Russotto, R. D., Tan, A., Gardiner, S. M. et Ackerman, T. P. (2017). Relevant climate response tests for 59 stratospheric aerosol injection: A combined ethical and scientific analysis. *Earth's Future*, 5(6), 577-591.
- Li, Y., Hu, S., Chen, J., Müller, K., Li, Y., Fu, W., Lin, Z. et Wang, H. (2018). Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: A review. *Journal of Soils and Sediments*, 18(2), 546-563.
- Livesley, S. J., McPherson, E. G. et Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45, 119-124.
- Lloyd, I. D. et Oppenheimer, M. (2014). On the design of an international governance framework for geoengineering. *Global Environmental Politics*, 14(2), 45-63.
- MacCracken, M. C. (2009). On the possible use of geoengineering to moderate specific climate change impacts. *Environmental Research Letters*, 4(4), 045107.
- MacMartin, D. G., Kravitz, B., Tilmes, S., Richter, J. H., Mills, M. J., Lamarque, J. F.,...Vitt, F. (2017). The climate response to stratospheric aerosol geoengineering can be tailored using multiple injection locations. *Journal of Geophysical research: Atmospheres*, 122(23), 12574-12590.
- Macnaghten, P. et Szerszynski, B. (2013). Living the Global Social Experiment: An analysis of public discourse on solar radiation management and its implications for governance. *Global Environmental Change*, 23(2), 465-74.
- Marchetti, C. (1977). One geoengineering and CO₂ problem. *Climatic Change* 1(1), 59-68. Repéré à <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00162777>

- Marshall, M. (2011). Political backlash to geo-engineering begins. *The New Scientist*, 212(2833), 7. Repéré à <http://www.newscientist.com/article/dn20996-politicalbacklash-to-geoengineering-begins.html>
- Mastrapostoli, E., Santamouris, M., Kolokotsa, D., Perdikatsis, V., Venieri, D., Gobakis, K. (2016). On the aging of cool roofs. Measure of the optical degradation, chemical and biological analysis and assessment of the energy impact. *Energy and Buildings*, 114(15), 191-199.
- McLaren, D. (2012). A comparative global assessment of potential negative emissions technologies. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), 489–500.
- Meenakshi, P. et Selvaraj, M. (2018). Bismuth titanate as an infrared reflective pigment for cool coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 530-537.
- Mercer, A. M., Keith, D. W. et Sharp, J. D. (2011). Public understanding of solar radiation management. *Environmental Research Letters*, 6(4), 9p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2012). *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques*. Repéré à http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (s. d.a). *Le système québécois de plafonnement et d'échange de droit d'émission*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/en-bref.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (s. d.b). *Le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre québécois et le marché régional du carbone de la WCI*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/forces-avantages.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (MDDELCC). (s. d.c). *Marché de carbone : crédits compensatoires*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/index.htm>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2015). *Cible de réduction d'émissions de gaz à effet de serre du Québec pour 2030*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/consultations/cible2030/consultationPost2020.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2018). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990*. Repéré à <http://mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2016/inventaire1990-2016.pdf>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F.,...Dominguez, M. D. M. Z. (2018). Negative emissions-Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001.
- Muri, H. (2018). The role of large scale BECCS in the pursuit of the 1.5°C target: An Earth system model perspective. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044010.
- Muri, H., Niemeier, U. et Kristjansson, J. E. (2015). Tropical response to marine sky brightening climate engineering. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2951-2960.

- Naik, M. et Abiodun, B. J. (2016). Potential impacts of forestation on future climate change in Southern Africa. *International Journal of Climatology*, 36(14), 4560-4576.
- Naraharisetti, P. K., Yeo, T. Y. et Bu, J. (2018). New classification of CO₂ mineralization processes and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 220-233.
- National Research Council. (2015). *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*. Washington, DC: The National Academies Press. Repéré à <https://www.nap.edu/catalog/18805/climate-intervention-carbon-dioxide-removal-and-reliable-sequestration>
- Nemet, G. F., Callaghan, M. W., Creutzig, F., Fuss, S., Hartmann, J., Hilaire, J.,...Smith, P. (2018). Negative emissions-Part 3: Innovation and upscaling. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063003.
- Nicholson, S., Jinnah, S. et Gillespie, A. (2018). Solar radiation management: A proposal for immediate polycentric governance. *Climate Policy*, 18(3), 322-334.
- Niemeier, U. et Timmreck, C. (2015). What is the limit of climate engineering by stratospheric injection of SO₂? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15 (16), 9129-9141.
- Niemeier, U. et Tilmes, S. (2017). Sulfur injections for a cooler planet. *Science*, 357(6348), 246-248.
- Okesola, A. A., Oyedele, A. F., Abdulhamid, J., Olowo, B. E., Ayodele, T. et Alabi, W. (2018). Direct Air Capture: A Review of Carbon Dioxide Capture from the Air. *Materials Science and Engineering*, 413(1), 12077.
- Okoro, S. U., Schickhoff, U. et Schneider, U. A. (2018). Impacts of Bioenergy Policies on Land-Use Change in Nigeria. *Energies*, 11(1), 152.
- Oliveira, F. R., Patela, A. K., Jaisib, D. P., Adhikaric, S., Lud, S., et Khanala, S. K. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, 246, 110-122.
- Olson, R. L. (2011). *Geoengineering for decision makers*. Washington, DC: Science and technology innovation program, Woodrow wilson international center for scholars. Repéré à https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Geoengineering_for_Decision_Makers_0.pdf
- Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture [UNESCO]. (2005). *Le principe de précaution*. Repéré à <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001395/139578f.pdf>
- Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec : évolution climatique au Québec. Partie 1*. Repéré à <http://cclo.ca/wp-content/uploads/2016/01/Changement-climatique-QC.pdf>
- Pacheco-Angulo, C., Vilanova, E., Aguado, I., Monjardin, S. et Martinez, S. (2018). Carbon emissions from deforestation and degradation in a forest reserve in Venezuela between 1990 and 2015. *Forests*, 8, 291.
- Paquet, D. (2015). Les forêts jouent un rôle dans la prévention des inondations et des sécheresses. *Actu Environnement*. Repéré à <https://www.actu-environnement.com/ae/news/ae-forets-prevention-inondations-secheresses-25551.php4>
- Pasztor, J. (2017). The need for governance of climate geoengineering. *Ethics and International Affairs*, 31(4), 419-430.

- Pasztor, J. (2018). Thoughts on governance from the IPCC special report. Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative. Repéré à <https://www.c2g2.net/thoughts-on-governance-from-the-ipcc-special-report/>
- Pidgeon, N., Parkhill, K., Corner, A. et Vaughan, N. (2013). Deliberating Stratospheric Aerosols for Climate Geoengineering and the SPICE Project. *Nature Climate Change*, 3(5), 451-457.
- Plazzotta, M., Séférian, R., Douville, H., Kravitz, B. et Tjiputra, J. (2018). Land Surface Cooling Induced by Sulfate Geoengineering Constrained by Major Volcanic Eruptions. *Geophysical Research Letters*, 45(11), 5663-567.
- Popp, A., Dietrich, J. P., Lotze-Campen, H., Klein, D., Bauer, N., Krause, M.,...Edenhofer, O. (2011). The economic potential of bioenergy for climate change mitigation with special attention given to implications for the land system. *Environmental Research Letters*, 6(3), 1-9.
- Preston, C. J. (2013). Ethics and geoengineering: reviewing the moral issues raised by solar radiation management and carbon dioxide removal. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4(1), 23-37.
- Psarras, P., Krutka, H., Fajardy, M., Zhang, Z., Liguori, S., Dowell, N. M. et Wilcox, J. (2017). Slicing the pie: how big could carbon dioxide removal be? *WIREs Energy and Environment*, 6(5), e253.
- Raftery, A. E., Zimmer, A., Frierson, D. M. W., Startz, R. et Liu, P. (2017). Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. *Nature Climate Change*, 7(9), 637-641.
- Rasch, P. J., Crutzen, P. J. et Coleman, D. B. (2008). Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size. *Geophysical Research Letters*, 35(2), L02809.
- Rayner, S., Heyward, C., Kruger, T., Pidgeon, N., Redgwell, C. et Savulescu, J. (2013). The Oxford Principles. *Climatic Change*, 121(3), 499-512.
- Richter, J. H., Tilmes, S., Mills, M. J., Tribbia, J. J., Kravitz, B., MacMartin, D. G.,...Lamarque, J. F. (2017). Stratospheric dynamical response and ozone feedbacks in the presence of SO₂ injections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(12), 557-573.
- Ridgwell, A., Singarayer, J. S., Hetherington, A. M., et Valdes, P. J. (2009). Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering. *Current Biology*, 19(2), 146-150.
- Robertson, G. P., Hamilton, S. K., Barham, B. L., Dale, B. E., Izaurralde, R. C., Jackson, R. D.,...Tiedje, J. M. (2017). Cellulosic biofuel contributions to a sustainable energy future: Choices and outcomes. *Science*, 356(6345), 1349.
- Robledo-Abad, C., Althos, H. J., Berdens, G., Bowlig, S., Corbera, E., Creutzig, F.,...Smith, P. (2017). Bioenergy production and sustainable development: Science base for policymaking remains limited. *Global Change Biology Bioenergy*, 9(3), 541-556.
- Robock, A. (2011). Bubble, bubble, toil and trouble: An editorial comment. *Climatic Change*, 105, 383-385.
- Robock, A. (2014). Stratospheric aerosol geoengineering. Dans R. E. Hester et R. M. Harrison (dir.), *Geoengineering of the Climate System: Issues in environmental science and technology*, (38, p. 162-184). Cambridge, Royaume Uni: The Royal Society of Chemistry. Repéré à <http://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/RobockStratAerosolGeo.pdf>

- Robock, A. (2016), Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: More research needed. *Earth's Future*, 4(12), 644-648.
- Rosso, F., Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Fabiani, C., Cotana, F., Ferrero, M. et Jin, W. (2017). New cool concrete for building envelopes and urban paving: Optics-energy and thermal assessment in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, 151, 381-392.
- Salter, S., Sortino, G. et Latham, J. (2008). Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 3989-4006.
- Sánchez, J. P. et McInnes, C. R. (2015). Optimal sunshade configurations for space-based geoengineering near the Sun-Earth L1 Point. *PLoS ONE*, 10(8), e0136648.
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R.,...Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment: Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14-33.
- Sasatani, D., Eastin, I., Bowers, C. T. et Ganguly, I. (2017). Public acceptance of pre-commercial thinning and energy and soil amendment products from post-harvest residues in western forests of the United States. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 34(1), 99-108.
- Schäfer, S. Lawrence, M. Stelzer, H., Born, W., Low, S., Aaheim, A.,...Vaughan, N. (2015). The European transdisciplinary assessment of climate engineering (EuTRACE): Removing greenhouse gases from the atmosphere and reflecting sunlight away from Earth. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/280068325_The_European_Transdisciplinary_Assessment_of_Climate_Engineering_EuTRACE_Removing_Greenhouse_Gases_from_the_Atmosphere_and_Reflecting_Sunlight_away_from_Earth
- Seitz, R. (2011). Bright water: Hydrosols, water conservation and climate change. *Climatic Change*, 105(3-4), 356-381.
- Seneviratne, S. I., Phipps, S. J., Pitman, A. J., Hirsch, A. L., Davin, E. L., Donat M. G.,...Kravitz, B. (2018). Land radiative management as contributor to regional-scale climate adaptation and mitigation. *Nature Geoscience*, 11(2), 88-96.
- Shafaqat, A., Rizwan, M., Farooq, M. Q., Ok, Y. S., Ibrahim, M., Riaz, M., Arif, S. M.,...Shahzad, A. N. (2016). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14), 12700-12712.
- Smith, Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S. Minx, J., Gabrielle, B.,...Yongsung, C. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6(1), 42-49.
- Smith, P. (2016). Soil Carbon Sequestration and Biochar as Negative Emission Technologies. *Global Change Biology*, 22(3), 1315-1324.
- Smith, C. J., Cook, J. A., Crook, R., Jackson, L. S., Osprey, S. M. et Forster, P. M. (2017). Impacts of stratospheric sulfate geoengineering on global solar photovoltaic and concentrating solar power resource. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(5), 1483-1497.
- Stirling, A. (2007). Deliberate futures: Precaution and progress in social choice of sustainable technology. *Sustainable Development*, 15(5), 286-295.

- Stjern, C. W., Muri, H., Ahlm, L., Boucher, O., Cole, J. N.S., Ji, D.,...Kristjánsson, E. (2018). Response to marine cloud brightening in a multi-model ensemble. *Atmospheric Chemistry Physics*, 18, 621-634.
- Streffer, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E. et Hartmann, J. (2018). Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(13), 034010.
- Talberg, A., Christoff, P., Thomas, S. et Karoly, D. (2018). Geoengineering governance by default: An Earth system governance perspective. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 18(2), 229-253.
- Tarr, N. M., Rubino, M. J., Costanza, J. K., Mckerrow, A. J., Collazo, J. A. et ABT, R. C. (2017). Projected gains and losses of wildlife habitat from bioenergy-induced landscape change. *Global Change Biology Bioenergy*, 9(5), 909-923.
- Taylor, L. L., Quirk, J., Thorley, R. M. S., Kharecha, P. A., Hansen, J., Ridgwell, A.,...Beerling, D. J. (2016). Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification. *Nature Climate Change*, 6(4), 402-406.
- The Royal Society, (2009). *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. Repéré à https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf
- Tilmes, S., Garcia, R. R., Kinnison, D. E., Gettelman, A. et Rasch, P. J. (2009). Impact of geoengineering aerosols on the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(D12), D12305.
- Transport Canada. (2015). Plan d'action du Canada pour réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'aviation. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/acs-reduire-gaz-a-effet-de-serre-aviation-menu-3007.htm>
- Tucker, O. (2018). *Carbon Capture and Storage*. Physics World Discovery. IOP Publishing, Inc., Philadelphia, PA, USA. Repéré à <http://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1581-4.pdf>
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2017). *The Emissions Gap report 2017, Nairobi*. Repéré à https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22070/EGR_2017.pdf
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). L'Accord de Paris. Repéré à <https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/the-paris-agreement/l-accord-de-paris>
- United States Government Accountability Office (USGAO). (2011). *Climate engineering: Technical status, future directions, and potential responses. Technology assessment*. GAO-11-71. Repéré à <https://www.gao.gov/assets/330/322208.pdf>
- Varet, J. (2014). La géo-ingénierie climatique. L'encyclopédie du développement durable. Repéré à <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/neige-neige-territoires-neige/3-1-quels-choix-energetiques/la-geo-ingenierie-climatique.html>
- Vaughan, N. E. et Lenton, T. M. (2011). A review of climate geoengineering proposals. *Climatic Change*, 109(3-4), 745-790.
- Vaughan, N. E. et Gough, C. (2016). Expert assessment concludes negative emissions scenarios may not deliver. *Environmental Research Letters*, 11(9), 095003.

- Vaughan, N. E., Gough, C., Mander, S., Littleton, E. W., Welfle, A., Gernaat, D. E. H.J. et Vuuren, D. P. V. (2018). Evaluating the use of biomass energy with carbon capture and storage in low emission scenarios. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044014.
- Viger, M., Hancock, R. D., Miglietta, F. et Taylor, G. (2015). More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar. *Global Change Biology Bioenergy*, 7(4), 658-672.
- Villeneuve, C., Riffon, O. et Tremblay, D. (2016). Comment réaliser une analyse de développement durable? Guide d'utilisation de la Grille d'analyse de développement durable. Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi. Repéré à <http://ecoconseil.uqac.ca/outil-de-gestion-des-mr/>
- Virgoe, J. (2009). International governance of a possible geoengineering intervention to combat climate change. *Climatic Change*, 95(1), 103-119.
- Visioni, D., Pitari, G. et Aquila, V. (2017). Sulfate geoengineering: a review of the factors controlling the needed injection of sulfur dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(6), 3879–3889.
- Visioni, D., Pitari, G., Tuccella, P. et Curci, G. (2018). Sulfur deposition changes under sulfate geoengineering condition: Quasi-biennial oscillation effects on the transport and lifetime of stratospheric aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(4), 2787-2808.
- Visschers, V. H. M., Shi, J., Siegrist, M. et Arvai, J. (2017). Beliefs and values explain international differences in perception of solar radiation management: insights from a cross-country survey. *Climatic Change*, 142(3-4), 531-544.
- Vives, B. (2013). *La géo-ingénierie est-elle une piste rationnelle pour atténuer le changement climatique? Le cas de la méthode de capture et stockage du CO₂*. Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement. Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique. Repéré à http://mem-envi.ulb.ac.be/Memoires_en_pdf/MFE_13_14/MFE_Vives_13_14.pdf
- Wang, Y., Yan, X. et Wang, Z. (2014). The biogeophysical effects of extreme afforestation in modeling future climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(3), 511-521.
- Wang, Y., Berardi, U. et Akbari, H. (2016). Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 114, 2-19.
- Wang, J., Xiong, Z. et Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *Global Change Biology Bioenergy*, 8(3), 512-523.
- Warren, F.J. et Lemmen D. S. (2014). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario). Repéré à https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2014/pdf/Rapport-complet_Fra.pdf
- Weisenstein, D. K., Keith, D. W. et Dykema, J. A. (2015). Solar geoengineering using solid aerosol in the stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(20), 11835-11859.
- Weiwei, L., Xiaoke, W., Fei, L., et Zhiyun, O. (2016). Influence of afforestation, reforestation, forest logging, climate change, CO₂ concentration rise, fire, and insects on the carbon sequestration capacity of the forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 36(8).

- Whitman, T., Scholz, S. M. et Lehmann, J. (2010). Biochar projects for mitigating climate change: an investigation of critical methodology issues for carbon accounting. *Carbon Management*, 1(1), 89-107.
- Wilhelm, M., Davin, E. L. et Seneviratne, S. I. (2015). Climate engineering of vegetated land for hot extremes mitigation: An Earth system model sensitivity study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(7), 2612-2623.
- Williamson, P., Wallace, D. W. R., Law, C. S., Boydd, P. W., Collose, Y., Crootf, P.,... Vivian, C. (2012). Ocean fertilization for geoengineering: A review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), 475-488.
- Wingenter, O. W., Haase, K. B., Strutton, P., Friederich, G., Meinardi, S., Blake, D. R. et Rowland, F. S. (2007). Changing concentrations of CO, CH₄, C₅H₈, CH₃Br, CH₃I, and dimethyl sulfide during the Southern Ocean iron enrichment experiments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(23), 8537-8541.
- Woelders, L., Lenaerts, J. T. M., Hagemans, K., Akkerman, K., Hoof, T. B. V. et Hoek, W. Z. (2018). Recent climate warming drives ecological change in a remote high-Arctic lake. *Scientific Report*, 8(6858). Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/324873074/download>
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, A., Lehmann, J., et Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(56).
- Wright, M. J., Teagle, D. A. H. et Feetham, P. M. (2014). A quantitative evaluation of the public response to climate engineering. *Nature Climate Change*, 4(2), 106-110.
- Yamagata, Y., Hanasaki, N., Ito, A., Kinoshita, T., Murakami, D. et Zhou, Q. (2018). Estimating water-food-ecosystem trade-offs for the global negative emission scenario (IPCC-RCP2.6). *Sustainability Science*, 13(2), 301-313.
- Ying, C. et Yuan, X. (2017). Implications of geoengineering under the 1.5 °C target: Analysis and policy suggestions. *Advances in Climate Change Research*, 8(2), 123-129.
- Zamf, B. M. et Conrado, R. (2015). Engineering plants to reflect light: Strategies for engineering water-efficient plants to adapt to a changing climate. *Plant Biotechnology Journal*, 13(7), 867-874.
- Zevenhoven, R. et Fäلتab, R. (2018). Radiative cooling through the atmospheric window: A third, less intrusive geoengineering approach. *Energy*, 152(1), 27-33.
- Zhang, Y., Hu, X., Zou, J., Zhang, D., Chen, W., Liu, Y.,... Wang, X. (2018). Response of surface albedo and soil carbon dioxide fluxes to biochar amendment in farmland. *Journal of Soils and Sediments*, 18 (4), 1590-1601.
- Zhang, Z., Moore, J. C., Huisingh, D. et Zhao, Y. (2015). Review of geoengineering approaches to mitigating climate change. *Journal of Cleaner Production*, 103(15), 898-907.
- Zürn, M. et Schäfer, S. (2013). The Paradox of Climate Engineering. *Global Policy*, 4(3), 266-77.